

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

Р. И. Сольницев

АВТОМАТИЗАЦИЯ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ
СИСТЕМ
АВТОМАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ

Допущено
Государственным комитетом СССР
по народному образованию
и качеству учебника
для студентов вузов,
обучающихся по специальности
«Автоматика и управление
в технических системах»



МОСКВА
«ВЫСШАЯ ШКОЛА»
1991

Рецензенты:

кафедра систем автоматического управления Московского государственного технического университета им. П. Э. Баумана, д-р техн. наук, проф.
Г. А. Дидук (Северо-Западный заочный политехнический институт)

Сложность современных объектов проектирования, особенно систем автоматического управления (САУ), постоянное ужесточение требований к проектам, чрезвычайно высокая цена ошибочных проектных решений входят в противоречие с традиционными инструментами и технологией проектирования. Выходом из положения является разработка и внедрение нового набора инструментов — инструментария проектировщика — системы автоматизации проектирования (САПР).

В учебнике рассматриваются концепции, методы, алгоритмы и построенные на их основе подсистемы САПР — инструменты проектировщика, применяемые в течение всего процесса проектирования, — от получения технического задания до передачи проектной документации на завод-изготовитель. При написании учебника использованы материалы лекций, прочитанных автором в Ленинградском электротехническом институте им. В. И. Ульянова (Ленинга) и читаемых в Ленинградском институте авиационного приборостроения, а также результаты решения практически важных задач проектирования САУ в промышленности с помощью САПР.

Методика изложения материала учебника направлена на то, чтобы будущий специалист в области САУ представлял себе весь сложный процесс их проектирования от согласования технического задания до испытаний и сдачи проекта заказчику, знал, для каких проектных задач какие подсистемы — инструменты — САПР следует применять; уметь разбираться в способах использования инструментов САПР исходя из основного условия эффективности автоматизации — каждый инструмент САПР должен применяться «по месту и по делу». Умение применять инструменты САПР САУ основывается на понимании того, каким образом строится САПР, ее структура и отдельные подсистемы, и на знании математических моделей, методов и алгоритмов, которые положены в основу этих подсистем.

Учебник предназначен в основном для будущих пользователей САПР — студентов вузов, изучающих САУ, по специальности «Автоматика и управление в технических системах», а также для студентов по специальностям «Электропривод и автоматизация промышленных установок», «Авиационные приборы и измеритель-

Сольников Р. И.

С60 Автоматизация проектирования систем автоматического управления: Учеб. для вузов по спец. «Автоматика и упр. в техн. системах» — М.: Высш. шк., 1991. — 335 с.: ил.

ISBN 5-06-000718-9

В учебнике изложены основы построения и применения систем автоматизации проектирования (САПР) систем автоматического управления (САУ). Рассмотрены Идеология и архитектура САПР САУ, описание ее подсистем и компоненты в применении к проектным процедурам и операциям на всех этапах проектирования САУ — от выдачи технического задания на проект до передачи технической документации на завод-изготовитель.

ББК 36.2-05

647.3

С 2004060000(4309000000)—121—129—91
001(01)—91

ISBN 5-06-000718-9

© Р. И. Сольников, 1991

ВВЕДЕНИЕ В АВТОМАТИЗАЦИЮ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

ио-вычислительные комплексы», «Робототехнические системы и комплексы», «Системы автоматизированного проектирования» и др. Ввиду новизны рассматриваемых вопросов учебник представляется полезным широкому кругу специалистов, занимающихся и интересующихся автоматизацией проектирования САУ.

Главы 8, 9 написаны совместно с канд. техн. наук доц. Ю. А. Троповым, § 6.1 — совместно с канд. техн. наук доц. В. Н. Андроновым.

За ценные замечания, сделанные при рецензировании рукописи, автор выражает глубокую признательность заслуженному деятелю науки и техники РСФСР д-ру техн. наук, проф. В. В. Соколовникову, д-ру техн. наук, проф. Г. А. Дядуку и канд. техн. наук, доц. Е. С. Лобусову, а также д-ру техн. наук, проф. Д. И. Батищеву, канд. техн. наук, доц. М. А. Кане и старшему научному сотруднику Ю. А. Ласукову за полезные предложения, позволившие улучшить рукопись.

Отзывы о книге можно направлять по адресу: 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14, издательство «Высшая школа».

Автор

§ 1.1. Системы автоматического управления (САУ)
как объекты проектирования

Системы автоматического управления и регулирования за долгий путь своего развития — от центробежных регуляторов паровых машин до современных комплексных САУ подвижными объектами — проникли во все области техники и стали определяющими при создании многих современных технических систем и устройств. Предполагая, что читатель достаточно знаком с основами теории систем управления, подробно представление которой имеется в ряде учебников [4, 6, 12, 16], напомним здесь лишь основные определения, необходимые для дальнейшего изложения. Как известно, САУ является более общим случаем, чем система автоматического регулирования (САР), под которой понимают частный случай САУ, предназначенной для поддержания некоторого заданного неизменного положения, состояния, режима работы управляемого объекта. Поэтому иногда САР называют *системами стабилизации* (например, углового положения самолета, скорости вращения вала турбины, температуры в некотором помещении и т. д.). В дальнейшем мы будем пользоваться терминами САУ и САР в зависимости от вида и назначения системы. В САУ обычно выделяют следующие основные устройства, из которых она состоит.

Объект управления (регулирования), представляющий собой машину, аппарат или установку, требуемый режим работы которых должен поддерживаться.

Регулятор, или управляющая часть САУ, поддерживает требуемый режим работы объекта управления либо изменяет этот режим в соответствии с заданным законом или программой управления. Регулятор, в свою очередь, включает в себя следующие устройства.

Измерительные и чувствительные устройства, предназначенные для измерения и преобразования регулируемых величин или возмущающих воздействий разнообразного физического происхождения в сигналы, передаваемые и используемые в САУ.

Программные, или задающие, устройства, предназначенные для выработки сигналов, меняющихся по заранее определенному закону.

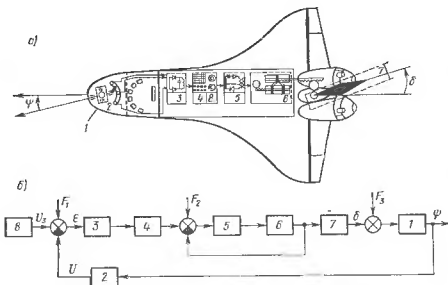


Рис. 1.1. Система автоматического управления ЛА по курсу

Усилительно-преобразующие устройства, предназначенные для усиления сигналов, проходящих в регуляторах. Эти устройства преобразуют сигналы и управляют энергией, поступающей от внешнего источника в управляющие воздействия различного физического происхождения (электрические, гидравлические, пневматические и др.).

Корректирующие устройства служат для обеспечения требуемых характеристик по устойчивости, качеству и точности управления (регулирования). Эти устройства также могут иметь различное физическое происхождение (электронные микропроцессоры, электрические цепи, электромеханические преобразователи, гидравлические и пневматические контуры).

Исполнительные устройства осуществляют непосредственное воздействие на объект управления (механическое, электрическое, гидравлическое, пневматическое и т. п.).

На рис. 1.1 приведена структура САУ летательного аппарата (ЛА) по курсу, включающая перечисленные устройства.

Управляемый объект (корпус ЛА) 1 (рис. 1.1, а) под влиянием исполнительного устройства 7 (руля курса) поворачивается на угол курса ψ ; измерительное устройство 2 (навигационный прибор) измеряет угол курса ψ и выдает пропорциональный ему электрический сигнал U на сравнивающее устройство, вырабатывающее сигнал рассогласования ϵ между задаваемым от программного устройства 8 (бортовая цифровая вычислительная машина (БЦВМ) или аналоговый задатчик курса) курсом $\psi_3(U_3)$ и из-

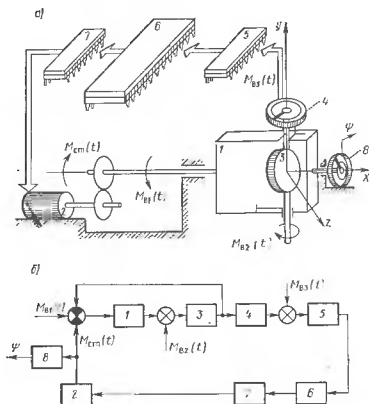


Рис. 1.2 Система автоматического регулирования гиросtabilизатора

меренным углом ψ ; сигнал ϵ поступает на усилительно-преобразующее устройство 3 и далее на корректирующее устройство 4 (микропроцессор, электрические цепи на операционных усилителях). Скорректированный сигнал через усилительно-преобразующее устройство 5 поступает на привод исполнительного устройства 6, которое перемещает руль 7 на угол δ . Как следует из структуры этой САУ (рис. 1.1, б), в ней имеется помимо основной местная обратная связь. Она содержит физически разнородные элементы (аэродинамический объект управления, электромеханические навигационные приборы, гидравлические приводы рулей, электронную БЦВМ и т. д.), в ней непрерывно меняется состояние отдельных устройств и системы в целом. Для выполнения основной цели — удерживать ЛА на заданном курсе — эта САУ должна удовлетворять многим критериям — быть высоконадежной, устойчивой к помехам и возмущениям $F_{1,2,3}$, обладать малой энергоемкостью и т. д. Ряд устройств, входящих в такую сложней-

шую систему, также является САУ. Так, в навигационных приборах широко применяются гиростабилизаторы, которые служат для измерения параметров углового движения ЛА, в данном случае курса, и стабилизации положения некоторой площадки (платформы) с установленными на ней приборами в неизменном положении относительно оси X . На рис. 1.2, а показана структура САР (системы стабилизации) одноосного гиростабилизатора. Объект управления 1 (стабилизиремая платформа) удерживается в заданном положении моментом стабилизации $M_{ст}$ исполнительного элемента 2. Отклонение от заданного положения, вызываемое возмущающим моментом $M_{в}$, фиксируется чувствительным элементом 3 (двухстепенной гироскоп). Сигнал с датчика угла 4 чувствительного элемента подается на усилительно-преобразующее устройство 5 или аналого-цифровые преобразователи (АЦП) и далее на корректирующее устройство 6 (операционные усилители, микропроцессор); усилительно-преобразующее устройство 7 (усилитель мощности, модулятор, цифро-аналоговый преобразователь — ЦАП) формирует сигнал управления исполнительным элементом 2 (асинхронный двигатель с редуктором), угол курса отсчитывается с датчика угла курса 8.

В этой САР, так же как и в первом примере, рассмотренном на рис. 1.1, имеется местная обратная связь (рис. 1.2, б). Элементы, входящие в систему, имеют разную физическую природу: механические, электрические, электронные чувствительные элементы и усилители; гидравлические или пневматические подвесы гироскопа. Система является существенно динамической из-за непрерывного «отслеживания» во времени t возмущающих моментов $M_{н,2,3}(t)$. Из основного требования к этой САР — высокой точности стабилизации в условиях действия многочисленных источников возмущений — вытекают многие критерии по динамическим и статистическим ошибкам, «уходам» гироскопа, кроме того, САР должна иметь малые массу и габаритные размеры, быть надежной в эксплуатации.

На рис. 1.3, а, б, в показана САУ шагающего робота (ШР), представляющего собой шестиножный шагающий аппарат. Объект управления 1 (корпус) под воздействием органов движения 2 («ноги» робота) перемещается в направлении, задаваемом блоком управления с программным устройством 3; чувствительные элементы 4, включая оптический дальномер 5, измеряют все составляющие движения и передают их на приводы 6 звеньев ног робота.

Местные системы автоматического регулирования для каждого сустава приведены на рис. 1.3, б, в, где показаны элементы САР, аналогичные рассмотренным в предыдущих примерах: объект регулирования — соответствующие суставы «ноги», исполнительный элемент — двигатель (Дв), прикладывающий момент M_i

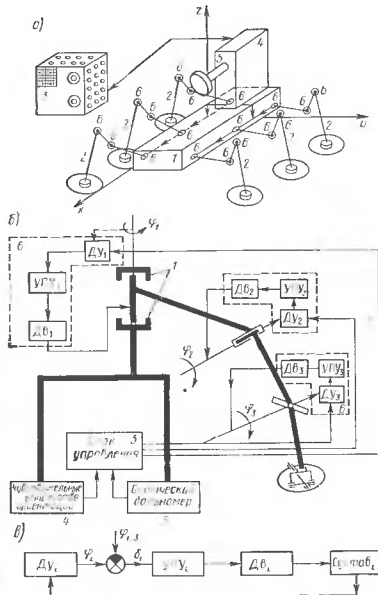


Рис. 1.3. Система автоматического управления ШР (шагающего робота)

к объекту регулирования; усилительно-преобразующее и корректирующее устройство (УПУ), измерительный элемент (ИЭ), с которого снимается угол поворота сустава ϕ . Помимо перечисленных элементов, эта САУ содержит блок управления, который на основе системы ориентации вырабатывает «стратегию» и «тактику» движения ШР. Микропроцессоры входят в локальные САУ этой САУ (УПУ) и в блок управления.

Наряду с основными обратными связями в этой многомерной САУ имеются местные обратные связи, множество разнородных физических элементов, непрерывные динамические процессы. Большое число противоречивых критериев характеризует работу этой САУ.

На рис. 1.4 представлена САУ турбогенераторной установки по частоте (скорости) вращения и давлению пара турбин. Объект регулирования — турбогенератор (ТГ) — включает в себя турбину и генератор 1. Регулирующий орган 6(6') изменяет скорость вращения вала турбины ω и давления пара p , подаваемого на лопасти турбины; чувствительные элементы 2(2') (индукционный датчик и датчик давления пара) посылают на сравнивающие устройства 3(3') измеренные и преобразованные скорость вращения турбины ω и давления пара p , откуда сигналы рассогласования $\epsilon_\omega, \epsilon_p$ попадают на усилительно-преобразующие устройства 4(4') и далее на исполнительные элементы 5(5'), перемещающие парораспределительные клапаны.

Физическая неоднородность этой САУ (объекта управления), гидроприводов, электромеханических преобразователей энергии, многочисленные местные обратные связи, сложная динамика процессов управления совпадают с аналогичными свойствами ранее рассмотренных САУ.

Обобщая характерные свойства САУ, рассмотренных в примерах, а также для широкого класса этих систем, можно выделить следующие их особенности:

1. Гетерогенность — физическая разнородность устройств и элементов, входящих в САУ.
2. Непрерывный динамический процесс их функционирования.
3. Многокритериальность условий их применения и работоспособности, при этом многие критерии противоречивы (точность и устойчивость, надежность и массогабаритные характеристики и т. д.).
4. Неопределенность задаваемых параметров и возмущающих воздействий, определяемая наличием не только внешних, но и внутренних «шумов», нестационарностью во времени параметров устройств САУ.
5. Внедрение микропроцессоров или управляющих ЦВМ в САУ.
6. Наличие нескольких контуров управления, многомерность САУ.

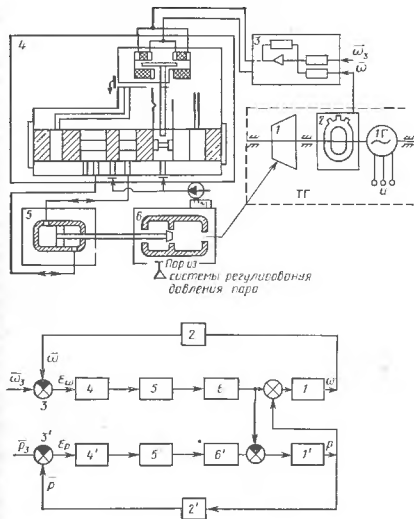
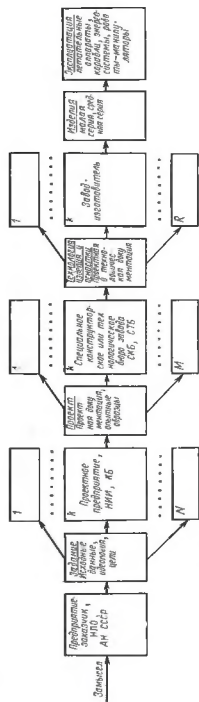


Рис. 1.4 Система автоматического регулирования турбогенератора

Эти основные свойства диктуют требования к проектированию и производству САУ как специфического класса технических систем. Серийное производство САУ является длительным дорогостоящим и весьма трудоемким процессом. Путь от заказа на конкретную САУ до ее внедрения в виде готового изделия в промышленность для эксплуатации на объектах народного хозяйства представлен на рис. 1.5.

Заказчик, которым может быть промышленное предприятие (научно-производственное объединение — НИО, научно-исследова-



тельский институт, конструкторское бюро, Академия наук и другие предприятия), формирует, согласовывает и выдает заказ на САУ. Такой «заказ» содержит идею, исходные данные и обоснование будущего объекта. Например, спроектировать САУ турбогенератора транспортного судна типа контейнеровоза, имеющего массу $15 \cdot 10^3$ т, движущегося со средней скоростью 9 м/с, и т. д.; спроектировать САУ шагающего робота (ШР), перемещающегося по твердой поверхности с препятствиями определенного характера, и т. д. Число исходных данных в задании может достигать многих десятков и даже сотен наименований.

Получение этого заказа *k*-й проектной организацией (НИИ и КБ) означает начало процесса проектирования.

Проектирование (от лат. *projectus* — «выдающийся вперед», «предварение») представляет собой процесс создания технической документации, опытных образцов и моделей объекта, необходимых и достаточных для его изготовления на заводе.

Как следует из самого определения, проектирование должно предвидеть прогресс техники и закладывать в проект структуры и параметры САУ, обеспечивающие превосходство проекта над имеющимися лучшими из известных в мировой практике аналогов.

Проектирование — один из древнейших видов человеческой деятельности — начиналось с создания кораблей, зданий, водопроводов, первых механизмов древних цивилизаций. В настоя-

щее время проектирование как необходимый и весьма весомый этап создания промышленных объектов, подобно мосту, соединяет идею будущего изделия с его изготовлением в «металле» на заводе. Существует множество проектных организаций, в каждой из которых работает от нескольких сотен до тысяч проектировщиков. Усилиями проектировщиков разрабатываются принципиальные схемы, чертежи, конструкции, технологические маршруты и множество другой технической документации, которая совместно с изготовленными на опытном производстве этого проектного предприятия опытными образцами представляет проект изделия.

Проект поступает в специальное конструкторское и технологическое бюро (СКБ) *k*-го завода. В СКБ осуществляется технологическая подготовка производства. Суть подготовки состоит в том, чтобы в соответствии с проектом, а также в соответствии с производственной практикой, составом станков, оснастки и приспособлений конкретного *k*-го завода разработать технологические маршруты и карты последовательности рабочих операций изготовления деталей, их сборки, контроля и сдачи заказчику. На завод поступает **проектная и технологическая документация**, которая должна одновременно определить все необходимые для изготовления готового изделия рабочие операции, производимые оборудованием завода (станками, транспортом, приспособлениями, оснасткой) над заготовками, комплектующими изделиями и материалами, поступающими на «вход» завода вместе с указанной документацией. **Изготовленное на заводе** изделие подвергается многочисленным испытаниям, по результатам которых осуществляется коррекция практически всех предыдущих этапов. После приемки изделия заказчиком начинается серийное изготовление и «жизнь» изделия, его эксплуатация в соответствии с его предназначением в народном хозяйстве.

Определив таким образом место проектирования в общей схеме проектирования и производства, дополним введенные понятия основными определениями в области проектирования.

Проектная процедура — совокупность проектных операций над исходными данными, выполнение которых заканчивается проектным решением.

Проектная операция — действие или совокупность действий проектировщика, составляющих часть проектной процедуры и заканчивающихся получением фрагмента проектного решения.

Проектное решение — промежуточное или конечное описание объекта проектирования, необходимое и достаточное для завершения проектной процедуры.

Проект — совокупность проектных документов (технической документации) в соответствии с установленным Единой системой конструкторской и технологической документации (ЕСКД, ЕСТД) перечнем, а также опытный образец, в которых представлен результат проектирования.

Средства проектирования — это инструменты, орудия труда проектировщика: карандаш, бумага, макеты, чертежные столы, ЭВМ и внедряемые в настоящее время средства САПР.

Рассмотрим особенности САУ как объектов проектирования.

В отличие от других объектов машиностроения и приборостроения, являющихся обычно отдельными устройствами, САУ представляет собой систему из устройств, работающих в режиме управления заданным объектом. При этом большой вес приобретают такие проектные процедуры, как анализ устойчивости, качества и точности САУ, синтез регуляторов (в том числе на микропроцессорах), построение математических моделей объектов регулирования и отдельных устройств регуляторов, математическое моделирование, сборка и стыковка отдельных конструктивных узлов. При проектировании САУ существенное значение приобретает физическая разнородность, гетерогенность устройств, входящих в систему, и возмущающих воздействий, действующих на нее. Анализ САУ в рассмотренных выше четырех примерах и других САУ показывает, что в устройствах САУ используются практически все известные и пригодные для технического применения физические явления. Это обстоятельство придает процессу проектирования САУ определенные особенности. Заказы на устройства САУ приходится размещать не в одном, а в нескольких проектных предприятиях по специализации (см. *Н НИИ и КБ*, рис. 1.5). Например, для САУ ЛА отдельные предприятия проектируют навигационные устройства, БЦВМ; для САУ шагающего робота устройства зрения и ощущения также разрабатываются на специальных предприятиях.

При разработке принципиальной схемы САУ приходится учитывать реальные (не идеализированные) характеристики и физическую природу ее элементов, источники их энергии, способы преобразования форм энергии и сигналов, место включения управляющих воздействий; при разработке конструкции и технологии изготовления существенное значение приобретают операции сборки и согласования разнообразных конструкторских и технологических форм отдельных устройств; важное значение приобретает проектирование в составе САУ управляющих ЦВМ (УЦВМ) и микропроцессоров. На проектных предприятиях САУ, как правило, имеются отдельные подразделения по проектированию УЦВМ и микропроцессоров. Проектирование этих устройств связано с разработкой как аппаратуры, так и алгоритмических и программных средств, что значительно расширяет круг вопросов, решаемых проектировщиками по сравнению с недавним прошлым. Испытания САУ становятся важнейшим этапом проектирования, так как никогда не удастся при разработке принципиальных схем учесть все специальные конструктивные, технологические и физические свойства отдельных устройств, входящих в САУ.

§ 1.2. САПР как новые средства проектирования

Рассмотрим развитие средств проектирования и покажем диалектическую неизбежность появления САПР.

Происходящая на наших глазах научно-техническая революция в значительной степени повлияла на создание современных САУ и, в частности, на процесс их проектирования. Начало 40-х годов оказалось тем рубежом, от которого ведет отсчет научно-техническая революция (НТР). Возникшие в тот период проблемы в области САУ уже не удавалось достаточно точно решить традиционными формальными и неформальными методами на основе только приближенных расчетов, макетирования, физического моделирования. Это объясняется тем, что создаваемые САУ стали гетерогенными, т. е. объединяющими физические разнородные звенья, требования при их создании и цели их применения стали иметь многокритериальный характер, появилось много случайных и неопределенных характеристик в описании этих объектов. Так, одно из значительных произведений человеческой мысли того периода — управляемый беспилотный самолет — оказалось объектом, в котором отразились все новые проблемы, характерные для начавшейся НТР. Сложность САУ, так же как и других объектов человеческой деятельности, в настоящее время растет по закону геометрической прогрессии. Анализ, проведенный советскими и зарубежными учеными*, показывает, что число объектов в технике удваивается в среднем через 10 лет, сложность объектов по числу включаемых в них деталей и узлов удваивается через 15 лет, требуемое время на создание этих объектов уменьшается в 2 раза через 10 лет, объем научно-технической информации, потребной для проектирования, удваивается через каждые 5 лет.

Одновременно сокращается время морального старения объектов в технике до 5 лет.

Естественно, что столь стремительный прогресс в технике потребовал применения *новых средств — инструментов* для проектирования и изготовления объектов. В каком же состоянии находятся эти новые инструменты? Анализ показывает, что состав инструментов — инструментарий проектировщика — существенно отстает от роста в нем потребности.

В инструментарий проектировщика 40-х годов таких сложных изделий, как управляемые беспилотные самолеты, входили: логарифмическая линейка, арифмометр, карандаш и бумага у разработчика (теоретика, главного конструктора); «кульман» и готвальды у конструктора; чертежные столы у технолога, макеты для «испытаний металлом», летно-конструкторские испытания всей си-

* Автоматизация поискового конструирования/Под ред. А. И. Половинкина. М., 1981.

Таблица 1.1. Проектирование САУ «старыми» инструментами

Инструменты	Проектные процедуры	Состав проектных документов
Библиотека, арифмометр	Согласование технического задания (ТЗ)	ТЗ. Точность, Вес и габариты... Ресурсы работы...
То же	Выбор структурной схемы	Структурная схема, теоретическое обоснование, ТЗ на элементы
Библиотека, арифмометр, макетирование	Расчет системы стабилизации (СС)	Отчет с таблицами, графиками, расчетом, ТЗ на элементы СС
То же	Выбор и расчет чувствительного элемента (ЧЭ) Расчет элементов СС	Отчет с таблицами, графиками, ТЗ на элементы ЧЭ Отчет с расчетами, таблицами, графиками
Библиотека, ГОСТы, кульман, чертежные столы	Процедуры конструкторского и технологического проектирования	Чертежи, технические условия, спецификации, технологические маршруты, монтажные схемы
Станки, оснастка, транспорт, склад	Изготовление опытных образцов	Известия об изменениях проектной документации
Макеты, стенды, измерительные приборы	Испытания	Протоколы испытаний, известия об изменениях проектной документации

стемы в целом у испытателя. Процесс проектирования при этом сводился к сочетанию приближенных расчетов, конструкторских прорисовок и испытаний металлом. При этом необходимая для расчетов информация «добывалась» из «библиотеки», включающей в себя таблицы, номограммы, справочники, ГОСТы, ОСТы, которые были наполнены множеством эмпирических коэффициентов. В табл. 1.1 показаны проектные процедуры, выходные проектные документы и «инструменты» проектировщика при проектировании устройства САУ (рис. 1.2) инструментами 40-х годов.

Начиная с середины 40-х годов к этим инструментам присоединились ЭВМ, в основном аналоговые (АВМ), на которых решались некоторые из проектных задач. В дальнейшем началось широкое внедрение ЭВМ (АВМ, ЦВМ, аналого-цифровых комплексов — АЦК) в проектное дело. Наконец, в настоящее время происходит разработка и внедрение нового инструментария проектировщика — САПР, которая представляет собой сложный комплекс технических и программных средств ЭВМ, а также других компонентов, из которых формируются отдельные инструменты проектировщика (разработчика, конструктора, технолога и испытателя). В результате внедрения САПР новыми инструментами проекти-

Таблица 1.2. Проектирование инструментами САПР

Инструменты	Проектные процедуры	Состав проектных документов
Генератор схем из БД, «Синтез», «Построение моделей»	Выбор структурной схемы	Структурная схема на обычных и машинных носителях
«Построение моделей», «Анализ», «Синтез», «Моделирование»	Расчет СС	Структура и параметры СС
«Анализ», «Синтез», «Моделирование»	Выбор и расчет чувствительного элемента (ЧЭ)	Структура и параметры ЧЭ
«Анализ», «Синтез», «Моделирование», «Расчет»	Расчет элементов СС	Структура и параметры элементов СС
«Конструкторский расчет», «Прорисовка чертежей»	Процедуры конструкторского и технологического проектирования	Конструкторская документация (КД) на обычных и машинных носителях
ПП «построителей» для станков с ЧПУ	Изготовление опытных образцов, подготовка управляющей программы для станков с ЧПУ	Управляющая программа, опытные образцы
ПП «Построение математических моделей», «Моделирование», «Обработка», макеты, опытные образцы	Испытания	Протоколы испытаний

ровщика будут инструментами «Построение моделей», «Анализ», «Синтез», ..., «Прорисовка чертежей» и др., включающие в себя такие компоненты, как базы данных (БД), алфавитно-цифровые (АЦД) и графические дисплеи (ГД), кодировщики графической информации (КГИ), графопостроители (ГП), пишущие автоматы (ПА), динамические моделирующие стенды (ДМС), соответствующие пакеты программ (ПП), математические методы и алгоритмы в сочетании со средствами организации и управления вычислительными процессами. В табл. 1.2 показаны те же, что и в табл. 1.1, составляющие процесса проектирования устройства САУ, но с помощью новых инструментов проектировщика — средств САПР. В проектном деле под влиянием НТР происходит естественная замена «старых» орудий труда на «новые», что полностью соответствует законам диалектики производительных сил.

В производительных силах (предмет труда, орудия труда и человек) наиболее динамичным звеном являются орудия труда. Именно их изменения приводят к качественному изменению производительных сил. Достаточно напомнить основные ступени развития орудий труда (инструментов) человека от каменных топоров до современных САПР и гибких производственных систем

Таблица 13. Основные этапы развития орудий труда

№ стадии	Жизненно важные проблемы	Новые орудия труда	Результат
1	Борьба за выживание с другими видами животных	Применение оружия (топор, палка, камень)	Господство над остальными видами
2	Крайне низкое производство продуктов питания	Сельскохозяйственные орудия и средства (мотыга, сола, плуги)	Устойчивое обеспечение питанием
3	Низкая эффективность обмена знаниями	Язык, книгопечатание	Возможность использовать чужой опыт и координация действий
4	Низкая скорость перевозок	Повозка, корабль	Перевозки по скорости соответствуют производству
5	Ограниченная производительность труда	Паровая машина	Резкое повышение производительности труда — промышленное машинное производство
N-1	Большое количество тяжелых физических однообразных, рутинных операций	Механизация труда на заводах и фабриках	Уменьшение ручного труда при увеличении объема изделий
N	Ограничения по качеству и производительности при проектировании и изготовлении новых изделий	Автоматизация, применение САПР и ППС	Повышение качества и эффективности проектирования и производства

(ППС). Закон изменения производительности орудий труда, представленных в табл. 1.3, во времени близок к экспоненте.

Как следует из табл. 1.3, диалектическая неизбежность появления новых инструментов, орудий труда вместо старых определяется жизненно важными для человечества задачами. В частности, в проектом деле на N-й стадии развития орудий труда проектировщика такими задачами являются: увеличение производительности труда проектировщиков, бездефектность проектной документации как основа исключения брака на производстве; автоматизация проектных процедур уже недоступных для проектировщика (проектирование БИС, СБИС, ЭВМ, современных узлов машиностроения, подготовка исходных данных для станков с ЧПУ в ППС).

Если раньше орудия труда, инструменты человека-производителя изготавливались индивидуально, кустарно, то сейчас существуют инструментальные цехи и целые инструментальные заводы. Средства САПР также должны изготавливаться специальными «инструментальными цехами САПР» либо из отдельных «пред-

приятий САПР». Дадим определение САПР как качественно новых средств на всех этапах проектирования.

САПР — это инструментарий проектировщика, включающий в себя техническое, математическое, лингвистическое, программное, информационное, методическое и организационное обеспечения и предназначенный для автоматизации проектирования объектов на конкретном предприятии на всех этапах — от выдачи технического задания до передачи проекта заводу-изготовителю.

Содержащийся в понятии САПР термин «система» (целое, составленное из частей) означает совокупность частей, связанных с общим назначением. Отличительный признак системы — ее целостность, т. е. наличие такой совокупности свойств, которой нет ни у одной из ее частей. Термин «автоматизация», также имеющийся в определении, происходит от слова «автомат» (греч. «самодельствующий») — устройство или совокупность устройств, которые без непосредственного участия человека выполняют процессы приема, преобразования, изготовления и передачи энергии, материалов и информации согласно заложенной в нем программе. Применение автоматов в практической деятельности человека и есть автоматизация — она освобождает его от утомительной однообразной работы, предохраняет от условий, опасных для жизни или вредных для здоровья, позволяет значительно повысить производительность труда и качество продукции. Известными примерами автоматов являются ЭВМ, роботы-манипуляторы, станки с ЧПУ. Там, где они применяются в системах, различают системы автоматизированные и автоматические. Примеры *автоматической системы* — линия станков, на «вход» которой поступает заготовка, а с «выхода» снимается готовая деталь, линия химического производства, на «вход» которой поступает нефть, а с «выхода снимаются» бензин, масла и другие нефтепродукты. Пример *автоматизированной системы* — автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП) изготовления микропроцессоров. Из определения САПР следует, что эта система не является автоматической и что она направлена на создание системы автоматизированного проектирования. Из этого определения также следует, что САПР создается для конкретного проектного предприятия (проектирование навигационных приборов, оптико-электронных устройств, САУ турбогенераторов и т. д.). Следует заметить, что понятие САПР как системы автоматизированного проектирования проектного предприятия подразумевает, что процесс автоматизации проектного дела уже завершен и проектные предприятия (НИИ и КБ) осуществляют практически автоматизированное проектирование. Однако такое состояние проектного дела является лишь целью, к которой необходимо стремиться. До достижения этой цели еще далеко.

Разработка САПР как инструментария проектировщика и внедрение инструментов САПР по мере их разработки, изготовления и опытной эксплуатации «инструмент за инструментом» (естественно, при заранее разработанной структуре САПР) является стратегией, позволяющей создавать именно автоматизированную систему проектирования. Такая стратегия находится в полном соответствии с развитием производительных сил и отвечает не только на вопрос, что является конечной целью автоматизации проектирования, но и как этой цели достичь!

САПР строится из подсистем, т. е. отдельных инструментов проектировщика, соответствующих конкретным процедурам.

Подсистема САПР состоит из *компонентов*. Компоненты — часть подсистемы (элемент САПР), из которых строится подсистема. С точки зрения разработчика САПР каждый инструмент САПР — сложная многокомпонентная конструкция, функционирование которой он обязан досконально знать. С точки зрения пользователя это удобный инструмент для выполнения проектных процедур. Это отличие — принципиальное!

Приведем определения обеспечений САПР, из компонентов которых формируются инструменты проектировщика.

Техническое обеспечение САПР — совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих аппаратных средств ЭВМ — ЦВМ, АВМ устройств ввода — вывода, в том числе алфавитно-цифровых и графических дисплеев (АЦД и ГД), графопостроителей (ГП) и печатающих автоматов (ПА), интеллектуальных терминалов, динамических моделирующих стендов, на которых осуществляется автоматизированное проектирование.

Математическое обеспечение — совокупность математических моделей, математических методов и алгоритмов, необходимых для выполнения автоматизированного проектирования.

Программное обеспечение — совокупность программ, описаний и инструкций, в том числе пакетов программ (ПП), составленных на основе математического обеспечения и предназначенных для реализации проектных процедур на ЭВМ.

Лингвистическое обеспечение это совокупность языков программирования, языков проектировщиков и правила формализации этих языков, представленных в форме, удобной для применения в составе САПР.

Информационное обеспечение — совокупность сведений, представленных на машинных носителях информации, в том числе баз данных (БД) и баз знаний (БЗ), содержащих нормативы, справочные данные, типовые проектные решения, закономерности и правила проектного процесса, которые необходимы для выполнения автоматизированного проектирования.

Методическое обеспечение — это совокупность документов, устанавливающих правила и инструкции по эксплуатации инструментов (подсистем) САПР.

Организационное обеспечение — совокупность документов, устанавливающих организационную структуру САПР, формы и порядок прохождения проектных документов, изготавливаемых средствами САПР; порядок взаимодействия должностных лиц, подразделений САПР и отделов проектной организации.

Из элементов (компонентов) этих обеспечений и строятся инструменты (подсистемы) САПР. Каждый инструмент включает компоненты всех семи обеспечений. Построение такого инструмента — сложный процесс, аналогичный созданию любого другого современного объекта промышленного производства.

Например, инструмент для расчета такого распространенного элемента САУ, как электродвигатель (ЭД), включает в себя: технические средства (АЦД и др.) для ввода исходных данных расчета характеристик ЭД (например, потребляемая мощность, пусковой момент, коэффициент полезного действия); компоненты математического обеспечения — формулы для расчета основных размеров ЭД, обмотки ротора и статора, магнитных цепей и т. д.; компоненты программного обеспечения из соответствующих программ электромагнитного, геометрического и других видов расчета ЭД; компоненты лингвистического обеспечения, в том числе проблемно-ориентированный язык расчета ЭД, его базу данных — справочно-информационных материалов; результаты расчета печатаются на алфавитно-цифровом печатающем устройстве (АЦПУ) в виде представленных в форме ЕСКД результатов расчета. Назначение компонентов других инструментов проектировщика ЭД соответствует целям применения этих инструментов.

§ 1.3. Этапы истории развития САПР САУ

Системы автоматизированного проектирования как научно-техническое направление возникло на основе длительного применения ЭВМ в проектном деле начиная с 50-х годов.

Рассмотрим здесь кратко этапы исторического развития средств САПР применительно к проектированию САУ и их элементов. В общих чертах все попытки по автоматизации решения задач проектирования САУ можно разделить на две большие группы.

Первая группа направлений в автоматизации является наиболее «старой» и широко распространенной при разработке САУ и их элементов. Она содержит направления, которые связаны только с разовыми применениями ЭВМ для инженерно-технических расчетов и научных исследований.

Работы по применению ЭВМ к проектированию САУ появились в начале 50-х годов сразу в нескольких областях техники. В 1954—1956 гг. расчеты устойчивости САУ сложных энергосистем на первых отечественных ЦВМ М-3 и МЭСМ проводились

Б. М. Каганом, Л. В. Цукерником в НИИ ЭП (Москва) и в АН УССР (Киев); В. С. Тарасовым, А. И. Важновым, Ю. В. Ракитским и другими проводились исследования статической и динамической устойчивости САР дальних электропередач для Волжской ГЭС. Помимо исследований устойчивости тем же коллективом осуществлялся анализ переходных процессов в САР электропередач на АВМ «Модель-2» и ЦВМ «Урал». Помимо расчетов САР электроэнергетических систем проводились расчеты их элементов. Так, с 1956 г. предварительные расчеты асинхронных двигателей мощностью от 0,6 до 100 кВт проводились на ЦВМ М-3 в НИИ ЭП под руководством Т. Г. Сорокера и Б. М. Кагана.

Другим важным применением ЭВМ начала 50-х годов были расчеты устойчивости и переходных процессов САУ летательных аппаратов и судов. К середине 50-х годов в этой области был накоплен уже значительный опыт анализа устойчивости и переходных процессов на АВМ и ЦВМ не только «плоского», но и «пространственного» движения. Были проведены исследования различных ЛА и судов как в движении относительно центра тяжести, так и траекторных движений центра тяжести по отношению к неподвижной системе координат, что существенно повысило качество проектных решений.

При анализе устойчивости САУ на ЦВМ помимо алгебраических методов применялись методы построения областей устойчивости в пространстве параметров, методы на основе построения корневых годографов, частотные методы на основе амплитудно-фазовых частотных характеристик. Характерной особенностью этапа 50-х годов было, пожалуй, преимущественное распространение АВМ как основного средства автоматизации проектирования САУ. ЦВМ применялись еще робко, только для предварительных расчетов типа «счет по формулам» и решений алгебраических, трансцендентных и дифференциальных уравнений невысокого порядка. В то же время другой характерной особенностью в этот период было выявление жизненной необходимости переноса на ЭВМ хотя бы части работы по испытаниям САУ и ее отдельных устройств, ибо стоимость и недостоверность результатов этих испытаний были весьма велики. Именно в это время выявлялась необходимость моделирования в реальном времени процессов динамики САУ с соединением в замкнутый контур математической модели объекта регулирования, реализованной на ЭВМ, и устройств САУ в виде реальной аппаратуры. Отсюда возникли чрезвычайно высокие требования к ЭВМ по быстротедействию. В этой связи создавались специальные моделирующие комплексы на АВМ, например «Тридак» фирмы «Эллиот» (Англия); появились ЦВМ для обработки результатов испытаний, например тига «Сейдж» (США), которая производила обработку результатов испытаний САУ ЛА, а система «Грэнпа» (США) производила обработку графиков записей процессов.

Первая Всесоюзная научно-техническая конференция МВ и ССО, проведенная в СССР в Москве в 1959 г., показала рост числа работ в области применения ЭВМ, в основном АВМ, в исследовании САУ и их элементов. Однако до превращения средств ЭВМ в инструмент проектировщика было еще далеко. Значительный вклад в создание инструментов САПР был сделан во второй половине 50-х годов с появлением первых устройств машинной графики в Массачусетском технологическом институте и соответствующего языка АРТ (Automatically Programmed Tools). Первоначально язык АРТ был предназначен для описания геометрии деталей при подготовке управляющей программы для станков с ЧПУ*.

С начала 60-х годов резко возрастает применение ЭВМ в проектировании РЭА и ЭВА. Примерно в это время появляется термин «машинное проектирование», который скорее соответствовал желаемому способу проектирования, чем возможностям применения ЭВМ как инструмента для проектирования на тот период. «Машинное проектирование» РЭА и ЭВА, которое уже соответствовало второй группе направлений автоматизации, связанной с совместным функционированием человека и ЭВМ как единой системы, в течение 60-х годов сводилось к появлению многих частных типовых программ расчета и конструирования, часто составленных в машинных кодах; объем таких программ достигал сотен тысяч команд, требовал работы многих программистов; в такие программы трудно было вносить изменения и дополнения. Тем не менее именно в автоматизации проектирования РЭА и ЭВА в этот период был достигнут наибольший прогресс. С помощью ЭВМ и комплексов программ получали таблицы переходов, диаграммы размещения элементов и трасс соединений, спецификации используемых материалов и другие проектные документы РЭА и ЭВА.

Наиболее существенные результаты были достигнуты на этапах конструкторского проектирования и технологической подготовки производства РЭА и ЭВА. В частности, система «Автограф» (рис. 1.6), разработанная в Ленинграде в 1967 г. под руководством Г. В. Орловского, была одной из первых систем автоматизации ряда этапов проектирования печатных плат РЭА. Такая система «Автограф» позволяла проектировать печатную плату от момента получения электрической схемы на нее до изготовления фотосаблонов на координатографе. Представляемые конструктору печатных плат «инструменты» системы «Автограф» включали в себя инструменты разводки соединений — трассировки — платы, размещения элементов, корректировки эскиза платы, изготовления перфоленда для управления координатографом и сверлильным

* Штурп Г., Краусе Ф.-Л. Автоматизированное проектирование в машиностроении, М., 1988.

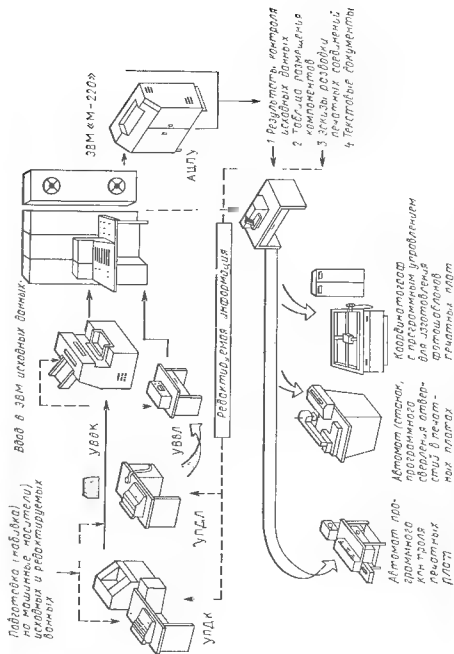


Рис. 1.5. Структура организации САПР печатных плат «Автограф»

станком. В дальнейшем многие САПР РЭА и их подсистемы аналогичного назначения использовали принципы и элементы системы «Автограф».

Характерной особенностью САПР «Автограф» и других САПР того времени были большие объемы и трудоемкость ввода и подготовки исходных данных на перфолентах и перфокартах (на рис. 1.6 – УВВК, УВЛ, УДК, УДЛ), малая скорость и низкая надежность технических средств.

С начала 60-х годов развиваются системы автоматизации проектирования устройств и элементов в машиностроении. Задачи машиностроительного проектирования* чрезвычайно разнообразны и почти всегда связаны с обработкой геометрической и графической информации. Создание средств машинной графики в 60-х годах фирмами «Calma», «Applicon» и другими позволило обеспечить прочный фундамент для автоматизации проектирования в машиностроении. Роль таких систем быстро возрастает с ростом автоматизации производства, с внедрением роботов-манипуляторов, станков с программным управлением. Например, чтобы с полной нагрузкой использовать станок с ЧПУ, в промышленности при средней серийности производства требуется постоянная работа двух инженеров-технологов по подготовке программ для ЧПУ, если подготовку производить вручную, поэтому применение ЧПУ немислимо без автоматизированной подготовки программ к ним.

Первой работой по автоматизации в машиностроении, получившей широкую известность, была работа А. М. Гильмана (Горьковский институт), в которой рассматривались описания геометрии детали, составление структуры технологического процесса, расчет режимов обработки, выбор инструментов и оснастки. Работы Г. И. Горанского, Д. М. Зозулевича и других показали практическую возможность и перспективность машинного проектирования процессов механической обработки деталей [7]. Общие принципы автоматизации проектирования систем управления технологическими процессами (СУТП) были предложены В. В. Солодовниковым**.

Следует отметить разработки по САПР устройств и элементов САУ в других отраслях промышленности, в том числе подсистем автоматизации проектирования средств контроля и автоматизации непрерывных процессов***, подсистемы расчета в САПР «Оптика», подсистемы расчета и конструкторской подготовки в САПР «Электронические машины», САПР «Гироскопические приборы», успеш-

* Этапы развития автоматизации проектирования машиностроения за рубежом подробно изложены в монографии Г. Шлур и Ф. Л. Краузе (см. ссылку выше).

** Солодовников В. В. Об автоматизации проектирования СУТП// Изв. вузов. Приборостроение. 1977. Т. XX. № 10. С. 24-34.

*** Шестихин О. Ф., Энгель Р. В. Машинные методы проектирования систем автоматического управления, Л., 1973.

но внедренных в промышленность. Эти подсистемы используются при разработке САУ, устройства которых включают в себя указанные объекты проектирования.

Большой интерес специалистов в области САУ вызвало появление ряда работ по анализу и синтезу электронных цепей на ЭВМ в рамках автоматизации проектирования РЭА. Системы программ AIDNET, OLCA, CIRCAL (США), разработанные под руководством Кацнельсона, Со, Дертусоза, позволяли строить переходные процессы и частотные характеристики по исходным математическим моделям объекта проектирования в виде обыкновенных дифференциальных уравнений или передаточных функций. Эти обстоятельства сближали задачи анализа электронных схем с анализом САУ. В 60-е годы происходило «накопление» машинно-ориентированных методов анализа и синтеза САУ. В конце 60-х годов появляются первые работы, обобщающие применение ЦВМ для анализа и синтеза САУ по временным и частотным характеристикам. В отечественной литературе это направление было представлено в первом издании монографии [2]. В общем, 60-е годы можно охарактеризовать как этап создания типовых программ и комплексов по анализу, синтезу САУ, расчету их отдельных элементов, конструкторскому проектированию печатных плат РЭА и отдельных узлов машиностроительных устройств.

С начала 70-х годов начинается этап построения пакетов программ машинного проектирования — комплексов из программных модулей, снабженных управляющей программой, создающей удобства пользователю для решения задач проектирования. Первые пакеты программ, созданные в АН Эстонии, рядом коллективов Москвы, Ленинграда, Новосибирска, Киева, знаменовали качественный скачок на пути создания инструментов проектировщика. В этом отношении предыдущий этап можно назвать «допакетным». В то же время разработка и применение машинных и машинно-ориентированных методов исследования САУ значительно отставали от роста парка и возможностей ЭВМ. Широкое развитие методов анализа и синтеза САУ привело к созданию многих интересных алгоритмов, но реализация на ЭВМ теоретически изящных алгоритмов часто приводила к значительным трудностям. Общие принципы построения вычислительных алгоритмов, пригодных для регулярного применения, в этот период еще только создавались. Тем не менее появился ряд программных систем, реализующих машинно ориентированные методы расчета САУ и их элементов. Были предложены алгоритмы и программы анализа и параметрического синтеза линейных регуляторов линейных объектов. Значительные результаты были достигнуты в создании методов и алгоритмов оптимизации САУ с помощью ЭВМ [1]. Появившиеся в дальнейшем пакеты программ (ПП) анализа и синтеза САУ в основном были ориентированы на программистов и узкий круг пользователей-специалистов по САУ, хорошо вла-

деющих алгоритмическими языками ФОРТРАН, АЛГОЛ. В это время появляются пакеты программ, получившие распространение в учебном процессе и промышленности для анализа и синтеза ряда САУ, в том числе МАСС, РАДИУС, СИАС, ГАММА и др.*

Еще раз напомним, что анализ и синтез САУ являются лишь частью процессов проектирования. Достаточно полный набор инструментов проектировщика САУ кроме анализа и синтеза должен включать в себя инструменты построения математических моделей, конструирования, расчета элементов, технологической разработки и т. д.

Временем завершения «пакетного этапа» в области САПР можно считать 80-е годы, когда ПП стали перерастать в подсистемы САПР — инструменты проектировщика, содержащие компоненты всех семи обеспечений САПР. Одним из прототипов САПР САУ является система машинного проектирования систем стабилизации и ориентации подвижных объектов [13].

Заканчивая эту главу, еще раз подчеркнем, что САПР ни в какой мере не заменяет человека-проектировщика с его творческими возможностями, опытом и интуицией. САПР всего лишь инструментарий в его руках, но инструментарий, значительно превосходящий по эффективности и возможностям традиционные «инструменты». Создание современных САУ все в большей степени зависит от использования САПР. Построение процесса проектирования САУ на основе САПР становится насущным требованием сегодняшнего дня. Причем дело не только в том, что сроки создания САУ непрерывно сокращаются, а их сложность увеличивается, но и в том, что заказчик составляет техническое задание на проектирование САУ уже с расчетом на применение САПР в процессе проектирования и передачу на завод проекта, созданного средствами САПР, минимизирующими ошибки традиционного процесса проектирования.

ГЛАВА 2

ПРОЦЕСС ПРОЕКТИРОВАНИЯ САУ И ЕГО АВТОМАТИЗАЦИЯ

§ 2.1. Цели, критерии и условия ограничений процесса проектирования

На каждом из предприятий, работающем в области проектирования, существует процесс проектирования со своей технологией, иногда весьма сложной и почти всегда неформализованной, с «плотехами» при передаче проектной информации, как «внутренней»,

* Автоматизация проектирования и конструирования, II Всесоюзное совещание, М., 1983 (Тезисы докладов, ч. II, с. 5—41).

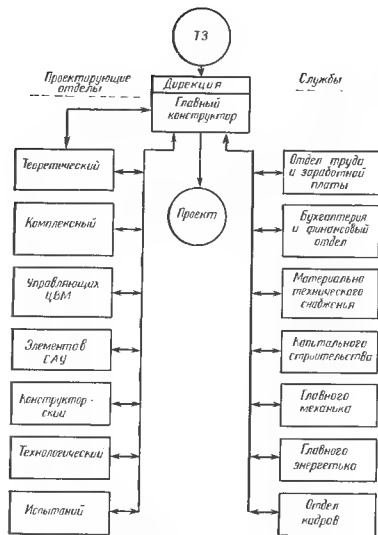


Рис. 2.1. Типовая структура проектного предприятия

так и «внешней». Таким образом, на каждом проектном предприятии существует своя организация системы проектирования (СП), которая отражает структуру, функции, иерархию отношений проектировщиков, производственную базу, а также историю, традиции и стиль работы этого предприятия.

В определенном смысле особенности «организма» проектного предприятия аналогичны организму человека — он так же глубоко индивидуален, имеет свою историю, генотип, свой характер, особенности взаимодействия головного мозга — органа управления;

рук и ног органов исполнения; глаз, ушей, кожи — органов чувств; обеспечивающих «служб» — органов пищеварения, кровообращения и т. д. На рис. 2.1 приведена типовая структура проектного предприятия. Как следует из этой структуры, управление процессом проектирования осуществляют дирекция и служба главного конструктора. Проектная информация и проектные документы пульсируют, передаются между подразделениями в соответствии с установленными правилами, отдельные группы проектировщиков исполняют те или иные проектные процедуры и операции, получают проектные решения; результаты этих решений «сообщаются» комплексным и другими отделами и передаются в виде обратных связей в главный конструкторат. Службы предприятия обеспечивают эти основные «проектные органы», осуществляя финансово-бухгалтерские операции, материально-техническое снабжение, капитальное строительство, работу с кадрами и, подобно органам кровообращения и пищеварения человека, неотделимы от основных «органов» проектного предприятия.

Традиционный процесс проектирования САУ, как правило, использует эволюционный подход, который включает в себя анализ предыдущих проектов и действующих САУ, выбор ближайшего прототипа — «старый проект», внесение в него изменений в соответствии с требованиями на «новый проект», многочисленные проверки соответствия «исправленного старого проекта» новым требованиям (целям, критериям), возвраты к точкам изменений при несоответствии результатов проектирования этим требованиям. Движение от исходных данных и сформулированных вначале целей проектирования к проекту носит итерационный характер, он никогда не является прямым, когда непосредственно по исходным данным, целям получают проект без каких-либо возвратов к предыдущим шагам. Более того, на основе ограниченных исходных данных шаг за шагом от приближенных очертаний проекта происходит его развитие до тех пор, пока проект не будет удовлетворять поставленным целям.

Цели создания САУ во многом определяются назначением объекта управления. В каждом случае перед проектным предприятием формулируется основная цель создания САУ:

— обеспечение полета ЛА по заданной траектории и стабилизация его положения по отношению к этой траектории, более конкретно — управление полетом самолета типа ТУ по маршруту в установленном эшелоне протяженностью в 2000 км, с точностью стабилизации по угловым параметрам до $0,1^\circ$, стабилизации высоты полета 8000 м с точностью 10 м, стабилизации скорости (числа Маха) с точностью 2% (рис. 1.1); сокращение неизменяемых в пространстве заданной оси или, в более общем случае, системы координат из трех осей, материализованных в гиросtabilизированной платформе (ГСП), конкретно — стабилизация платформы с установленными на ней «пассажирками» (пеленгаторами).

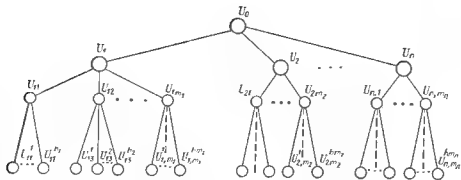


Рис. 2.2. Дерево целей проектирования САУ

ры, антенны и т. д.) в инерциальном пространстве (относительно осей x, y, z , направленных на звезду) с точностью не хуже $2'$ по каждой из осей (рис. 1.2);

— управление перемещением шагающего робота по заданной поверхности с препятствиями (перемещение в произвольном направлении с преодолением препятствий высотой или глубиной до 30 см, рис. 1.3);

— удержание в требуемых пределах скорости вращения вала турбины и давления пара турбогенератора, стабилизация частоты вращения в пределах 2—3% при изменении нагрузки от 10 до 20%.

Главная цель U_0 создания САУ подчиняет себе более мелкие цели $U_1, U_2, \dots, U_n$, которые ставятся перед отдельными устройствами, входящими в САУ (чувствительные, усилительно-преобразующие устройства, микропроцессоры, БЦВМ и т. д.), цели построения устройств САУ подчиняют себе подцели создания элементов еще более низкого уровня $U_{11}, U_{12}, \dots, U_{nm}$: гироскоп, датчики угла и момента — в блоке ГСП; аналого цифровой и цифро-аналоговый преобразователь — в усилительно-преобразующем устройстве; процессор, оперативное запоминающее устройство, устройство управления — в БЦВМ, и т. д.

Таким образом, можно сформировать иерархию — «дерево» целей. Дерево целей отражается графом (рис. 2.2), в котором каждая вершина отображает цель создания конкретного устройства, элемента САУ, а дуги показывают подчиненность (иерархию) целей низших уровней более «высоким» целям.

Характерно для САУ то обстоятельство, что при формулировании целей построения ее отдельных устройств главная цель их создания часто теряется. Так, САУ ЛА включает в себя: навигационные устройства, назначение которых — измерение углового и линейного положения ЛА в заданной системе координат и

формирование соответствующих сигналов; рулевые машины, назначение которых — перемещение рулей курса, тангажа, крена в соответствии с управляющими сигналами, и т. д. Очевидно, что цели их функционирования становятся лишними смысла, если не учитываются цели САУ, где работают навигационное устройство и рулевые машины. Аналогичное положение возникает с целевым назначением пог робота, золотников и клапанов турбогенератора и т. д. Поэтому формирование дерева целей является необходимым условием формирования исходных данных на создание как САУ в целом, так и отдельных ее устройств.

В процессе проектирования главная и подчиненные ей цели проектирования САУ трансформируются в конкретные критерии проектирования ее устройств и элементов. К таким критериям относятся запасы устойчивости САУ, характеристики качества процессов динамики, динамическая и статическая точность, надежность, время готовности к работе и т. д.

Цели и критерии проектирования имеют исключительно важное значение, так как они определяют и направляют весь процесс проектирования, труд многочисленных проектировщиков. Цели и критерии проектирования встречаются при их воплощении *ограничения*, к которым относятся сроки проектирования, стоимость проекта, возможности физической реализации проекта в готовом изделии, материальные и технические ресурсы проектного предприятия, квалификация проектировщиков, наличие комплектующих изделий и материалов. Сроки проектирования устанавливаются с учетом наискорейшего достижения цели создания САУ на мировом уровне, исключения морального устаревания проекта и в то же время возможностей реального проектного предприятия. Ограничения по физической реализуемости устанавливаются из условий воплощения в проекте новейших достижений науки и техники, но реально выполнимых «с металлом» при производстве.

Каждое конкретное проектное предприятие имеет ограничения на оборудование опытного производства, вычислительную и измерительную технику, количество квалифицированных проектировщиков и т. п., через которые «не перепрыгнешь», каким бы заманчивым ни казался максимальный в смысле наискорейшего и наилучшего достижения целей вариант процесса проектирования.

Стоимость (цена) проекта является жизненно важным ограничением. Она во многом определяется общегосударственными интересами, финансовыми возможностями заказчика и т. п. Подробное представление цели, критерии и ограничения проектирования САУ и ее отдельных устройств получают в техническом задании (проектных требованиях). Следует особо отметить условия работы проектируемой САУ, которые также отражаются в требованиях на проект. Эти условия содержат данные о возмущающих воздействиях на САУ в процессе ее эксплуатации, климатических

условиях, длительности работы, особенностях объекта управления. Так, для ЛА важны такие условия эксплуатации, как вибрационные, ударные возмущения, температура окружающей среды, длительность полета и т. д., для ГСП — механические возмущения, влияние тепловых, магнитных и других полей; для шагающих роботов — помехи от источника питания, гравитационные изменения при эксплуатации на других планетах. Цели, критерии, ограничения и условия должны быть отражены в техническом задании на проектирование САУ.

Техническое задание на проектирование САУ и ее устройств в соответствии с ГОСТ 15100-80 включает в себя следующие основные разделы:

1. Наименование, цель и область применения.
2. Основание для создания.
3. Требования к техническим характеристикам.
4. Условия эксплуатации.
5. Экономические показатели — затраты на проектирование, источники финансирования.
6. Условия и серийность производства.
7. Порядок испытаний и ввода в действие.
8. Сроки проектирования.

Кроме этих основных требований техническое задание (ТЗ) может включать многочисленные характеристики, условия эксплуатации и производства САУ и ее устройств.

Эти основные разделы ТЗ наполняются конкретными требованиями и условиями проектирования САУ, записанными на профессиональном диалекте технического языка проектировщика.

Пример 2.1. ТЗ на проектирование турбогенератора САР (ТГ) включает в себя следующие требования:

По разделу 1. Цель и назначение проектируемой САР: выполнение функций стабилизации и ограничения основных параметров турбогенераторных установок, которыми после промышленного их изготовления будут оснащаться электрические станции.

По разделу 2. По сравнению с известными САР ТГ проектируемая САР позволит повысить эффективность использования ресурса ТГ, надежность его работы, сокращение расходов на изготовление. Работа выполняется на основании заказа министерства, начало работы — II квартал 199 г., окончание — IV квартал 199 г.

По разделам 3-4. САР должна обеспечивать регулирование частоты (скорости) вращения вала турбины с допустимой погрешностью 0,5%; регулирование давления за нагнетателем с допустимой зоной нечувствительности от 0,2 до 2%; регулирование температуры рабочих газов и масла в следующем приводе с допустимой погрешностью $\pm 0,5\%$; ограничение приемистости ТГ по скорости. По исполнению конструкция должна быть построена по агрегатно-блочному принципу; подвод внешних связей к САР должен осуществляться снизу; необходимо обеспечить легкий доступ к монтажу, технологичность ремонта, простоту обслуживания.

По надежности — блокнот САР должны быть выполнены не ниже III группы надежности, что соответствует вероятности безотказной работы за 2000 ч не менее 0,9;

— *средний срок службы САР ТГ* — 6 лет.

По разделу 5 Ориентировочная величина годового экономического эффекта внедрения одной САР более 20 тыс. руб. Лимитная цена САР ориентировочно 50 тыс. руб.

Полное раскрытие всех разделов ТЗ в данном примере занимает 25 листов текста на формате А-4. Примерно такой же объем этого проектного документа и для проектирования САУ в примерах, представленных на рис. 1.1, 1.2, 1.3.

§ 2.2. Этапы проектирования и проектные процедуры

Проектирование как сложный итерационный процесс реализуется по этапам. Обычно этапы проектирования САУ задаются ГОСТом или ОСТом данной отрасли промышленности, а уточняются на конкретном предприятии и делятся на следующие: согласование ТЗ, техническое предложение, эскизный проект, рабочее проектирование, изготовление опытных образцов, испытания. На каждом этапе проектирования совершается очередной «виток» прохождения будущего проекта через все критерии и ограничения, воздвигаемые целями проектирования и возможностями проектного предприятия. Процесс проектирования можно представить сходящейся спиралью (рис. 2.3). Каждый виток такой спирали обязательно проходит через все критерии и ограничения, сформулированные в ТЗ и уточненные в дальнейшем проектировании. По мере продвижения к окончательному проекту спираль скручивается, отбрасывая все негодные, побочные и малозначимые проектные решения и другие ненужные продукты процесса проектирования и оставляя только те проектные решения, которые, будучи воплощены в техническую документацию, и составят окончательный проект. Диаметр каждого витка этой условной спирали сужается, отражая характерную черту процесса проектирования — продвижение от расплывчатой, широкой, неопределенной во многих деталях *начальной итерации проекта* к конкретному завершенному в технической документации и опытным образце *окончательному проекту*. Чтобы перейти от одного витка к другому, более высокому, требуется затратить много труда и энергии большого коллектива проектировщиков, что во времени растягивается на долгие месяцы и даже годы, так как ограниченность проектного предприятия в численности квалифицированных проектировщиков и других ресурсах не дает возможности сразу же получать проектные решения по всем направлениям.

На рис. 2.4 приведена общая схема этапов проектирования САУ. Разберем последовательно содержание этих этапов.

Этап согласования технического задания обычно реализуется во взаимодействии предприятия «заказчика» и предприятия «проектировщика». Заказчик, естественно, стремится получить от проектировщика все, что он хотел бы воплотить в проекте. Проектировщик исходит из конкретных возможностей проектного предприятия и тех необходимых в проектом деле и сохраняемых на непредвиденные случаи запасов ресурсов, а так-

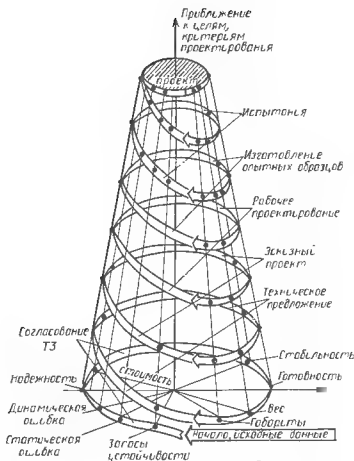


Рис. 23. Представление процесса проектирования в виде спирали

же предварительных заделов по аналогичным разработкам, которыми он располагает. Техническое задание (ТЗ) бывает двух типов: на проектирование САУ по известным прототипам с указанием существенных отличий и на проектирование новой САУ с детальным перечислением всех существенных свойств и характеристик (см. пример 2.1). В любом случае идейная основа задания на проектирование исходит от «заказчика», который в условиях возрастающей конкуренции должен внимательно следить за мировым уровнем САУ вообще и конкретным их использованием в той или иной предметной области. «Заказчик» и «проектировщик» при разработке ТЗ должны обязательно убедиться в *существовании* решения задач проектирования — сходимости спирали проектирования к проекту при заданных условиях и ограничениях.

Предварительный вариант ТЗ составляется «проектировщиком» и согласуется с «заказчиком» по каждому пункту. Часто по отдельным пунктам ТЗ возникают конфликтные ситуации, которые затягивают процесс согласования. В принципе требования и ограничения при проектировании противоречат друг другу, поэтому спроектировать «идеальную» САУ невозможно. Наилучший реальный проект — тот, в котором наиболее эффективно найден компромисс.

В результате согласования появляется ТЗ как официальный документ, который содержит десятки листов текста, выполняется по ГОСТ 15101 -80 и утверждается заказчиком и проектировщиком. На рис. 2.5 показан титульный лист ТЗ на САУ ТГ.

Техническое задание на САУ в целом порождает множество так называемых частных ТЗ на отдельные устройства САУ и их элементы (см. рис. 2.4). Эти ТЗ согласовываются между самими проектировщиками внутри проектного предприятия. Здесь также, разумеется, возникают конфликтные ситуации, и процесс согласования ТЗ повторяется, но на более низком уровне. Например, проектировщик САУ турбогенератора выдает ТЗ на чувствительные элементы, следящий привод и другие устройства подразделения, проектирующим элементы САУ турбогенератора. Возникает дерево из ТЗ, аналогичное дереву целей. Первый ярус такого дерева — ТЗ на отдельные устройства, второй ярус получается из ТЗ на элементы этих устройств, далее идут ТЗ на конструкторскую и технологическую разработку, испытания. Рождение и рост такого дерева легко проследить на рис. 2.4.

Этап *технического предложения* предназначен для исследования и разработки принципов построения САУ, определения возможности выбора готовых или разработки новых ее устройств, определения путей и способов проектирования. На этом этапе формируется принципиальная схема САУ, осуществляются предварительные расчеты и оценки динамических, точностных и других характеристик САУ, т. е. проходит второй виток спирали (см. рис. 2.3) по всем критериям и ограничениям. Применяются анализ прототипов САУ, математическое моделирование и испытания прототипов, макетов САУ и ее устройств. Осуществляются предварительные конструкторские и технологические проработки по стыковке устройств САУ и самим устройствам. Подготавливаются частные ТЗ на устройства и элементы САУ. На этом этапе делаются первые попытки решения конфликтных ситуаций процесса проектирования между требованиями ТЗ и ограничениями проектного предприятия. Этап завершается защитой «аванпроекта» — предварительного проекта, который, развивая ТЗ, дает следующую итерацию проекта.

Аванпроект обычно представляет собой достаточно объемный комплект документов, как правило, текстовых, выполненных по ГОСТ 2.118—73. Этот документ в отличие от ТЗ содержит не

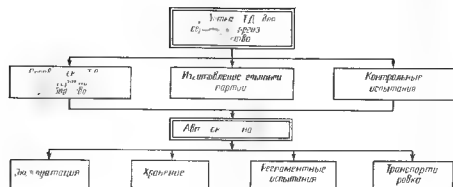


Рис. 2.4. Продолжение

только задание, условия и ограничения, но и предварительные данные по будущей САУ — варианты структурных и функциональных схем всей системы и ее устройств, расчеты динамики и точности, массы и габаритов, предложения по конструкторским и технологическим решениям.

Этап эскизного проектирования начинается с результатов предыдущего этапа и заканчивается *принципиальной схемой САУ* и ее устройств. Именно принципиальные схемы, выбранные и детально обоснованные на этом этапе расчетами, моделированием, испытаниями на макетах, служат основой для разработки конструкторской и технологической документации по изготовлению САУ и ее устройств на заводе «в металле». *Принципиальные схемы являются неотъемлемой частью проекта, что качественно отличает этот этап от предыдущих.*

На этапе эскизного проектирования осуществляется декомпозиция (разбиение) САУ на устройства, а устройств — на элементы. Ведется сложная, кропотливая разработка и взаимная увязка этих устройств и элементов. На этом третьем витке «большой спирали» (см. рис. 2.3) вновь проходят все критерии, условия и ограничения проектирования, но при этом активно начинают работать «малые спирали» — проектирование отдельных устройств САУ. Здесь все более или менее аналогично САУ в целом, но критерии, условия и ограничения носят более детальный и конкретный характер, сроки проектирования и стоимости меньше. Документация, выпускаемая на этом этапе, за исключением принципиальных схем, называется *эскизной*. Она носит временный характер и служит для изготовления отдельных экспериментальных макетов и образцов устройств САУ и контрольно-измерительной аппаратуры (КИА). Такая документация содержит эскизы конструкций, технологических карт, монтажных схем, условий техниче-

МИНИСТЕРСТВО					
СОГЛАСОВАНО		УТВЕРЖДАЮ			
НАЧАЛЬНИК ОБЪЕДИНЕНИЯ		НАЧАЛЬНИК ОБЪЕДИНЕНИЯ			
_____ / _____ /		_____ / _____ /			
" " 1990 г.		" " 1990 г.			
СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО			РЕГУЛИРОВАНИЯ		
ТУРБОГЕНЕРАТОРА					
ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ					
СОГЛАСОВАНО:					
ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР НПО		ДИРЕКТОР ИНСТИТУТА АВТОМАТИКИ			
_____ / _____ /		_____ / _____ /			
" " 1990 г.		" " 1990 г.			
ГЛАВНЫЙ КОНСТРУКТОР ПО АВТОМАТИКЕ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЮ					
_____ / _____ /		_____ / _____ /			
" " 1990 г.		" " 1990 г.			
ГЛАВНЫЙ КОНСТРУКТОР ПО ГАБРИТУРОВОБОРУДОВАНИЮ					
_____ / _____ /		_____ / _____ /			
" " 1990 г.		" " 1990 г.			
Имя.Н подл	Подп. и дата	Взам. инв.Н	Имя.Н д/сл	Подп. и дата	

Рис. 2.5. Титульный лист ТЗ

ской эксплуатации, предварительное программное обеспечение БЦВМ САУ ЛА и микропроцессоров в САУ ШР, ГСП, турбогенератор, программы проведения испытаний. По этой эскизной документации на опытно-производстве изготавливаются макеты устройств САУ и КИА. Макеты устройств САУ объединяются в комплексные стенды, на которых начинается реализация наиболее трудоемких и сложных проектных процедур САУ — стыковки отдельных ее устройств и элементов методами стендовых испытаний и физического моделирования.

Параллельно проводятся расчеты САУ. Составляются математические модели объекта управления, устройств САУ, алгоритмы работы мини- и микропроцессоров; решаются задачи анализа и синтеза регуляторов в САУ, оптимизации ее параметров, вырабатываются вычислительные алгоритмы для мини- и микропроцессоров САУ. В дальнейшем проводятся конструкторские расчеты устройств САУ на прочность, жесткость, определяются моменты инерции и центры тяжести, составляются программы для микропроцессоров САУ, осуществляются и рассчитываются надежность, стабильность, отлаживается программное обеспечение мини и микропроцессоров САУ; проводится детальное технико-экономическое обоснование проекта. Эскизный проект выпускается в виде нескольких книг текстовой и эскизной конструкторской документации. На научно-техническом совете предприятия производится защита эскизного проекта. По результатам эскизного проекта вносятся изменения и уточнения в ТЗ, проводится оценка заказчиком правильности движения процесса проектирования к главной цели, соответствия этой цели принятых проектировщиком технических решений и принципов.

Этап рабочего проектирования предназначен для разработки полного комплекта технической документации, необходимой для изготовления САУ и ее устройств на заводе. Начало этого «витка» процесса проектирования принципиальные схемы и другие результаты эскизного проекта, его конец — электрические, кинематические, монтажные схемы; конструкторские чертежи общего вида и деталей, спецификации комплектующих изделий и материалов; программная документация для мини- и микропроцессоров — инструкции программиста, описание программы, листинги; технологическая документация технологические карты, маршруты. В соответствии с требованиями ГОСТов, ЕСКД в проекте должны быть следующие обязательные документы [8, 10, 17]: 1. Чертежи деталей. 2. Сборочный чертеж. 3. Теоретический чертеж. 4. Габаритный чертеж. 5. Монтажный чертеж. 6. Схема. 7. Спецификации. 8. Ведомость спецификаций. 9. Ведомость согласования документов. 10. Ведомость паспортов изделий. 11. Ведомость согласования применения покупных изделий. 12. Ведомость держателей подписников. 13. Технические условия. 14. Программа и методика испытаний. 15. Таблицы результатов испыта-

ний. 16. Конструкторские расчеты. 17. Документы на прочие расчеты. 18. Патентный формуляр. 19. Условия эксплуатации. 20. Документы на ремонтные работы. 21. Карта технического уровня и качества продукции.

На рис. 2.6 показан фрагмент конструкторской документации на элемент генератора САУ ТГ.

По ЕСТД, технологическая документация [7, 8] содержит 14 документов, один из них графический (карта эскизов), остальные текстовые, в том числе: 1. Маршрутная карта. 2. Ведомость деталей сборочных единиц. 3. Типовой технологический процесс. 4. Карта технологического процесса. 5. Операционная карта.

Описание технической документации здесь не приводится, так как подробное знакомство с перечисленными документами обычно проводится на промышленных предприятиях во время производственной практики студентов технических вузов.

В процессе рабочего проектирования по конструкторской и технологической документации изготавливаются опытные образцы САУ и ее устройств. Завершается этап рабочего проектирования изготовлением опытных образцов и их автономными испытаниями.

Этап испытаний является неотъемлемой частью процесса проектирования. Испытания прототипов, макетов начинаются уже на первых витках проектирования, а испытаниями опытных образцов завершается процесс проектирования. На рис. 2.4 показаны основные подэтапы испытаний и их место в процессе проектирования. Испытания проводятся начиная с первых этапов и продолжаются до окончания проекта. Вначале испытаниям подвергаются макетные образцы САУ и ее устройств, составленные из элементов прототипов проектируемой САУ, затем технологические образцы, изготовляемые на опытно-производстве по эскизной документации. Во время лабораторных испытаний детально проверяются методами физического эксперимента (испытанием металлом) функционирование, динамические и точностные характеристики, стабильность, надежность и другие характеристики предполагаемых в проекте структур и схем САУ и ее устройств. При этом задаются требования по отношению к требованиям ТЗ возмущения и условия эксплуатации. Это делается, чтобы выявить уже на ранних этапах проектирования непригодные проектные решения и в то же время чтобы убедиться в правильности принципиальных проектных решений. Стенды с аппаратурой САУ, подлежащей лабораторным испытаниям, как правило, составляются и сохраняются в течение всего процесса проектирования. По результатам лабораторных испытаний оформляются протоколы, которые включаются в отчеты по авиaproекту, эскизному проекту и в техническую документацию проекта в целом.

Заводские испытания проводятся после получения опытных образцов, в том числе готовых комплектующих САУ устройств и элементов, изготовления не выпускаемых промышленностью ус-

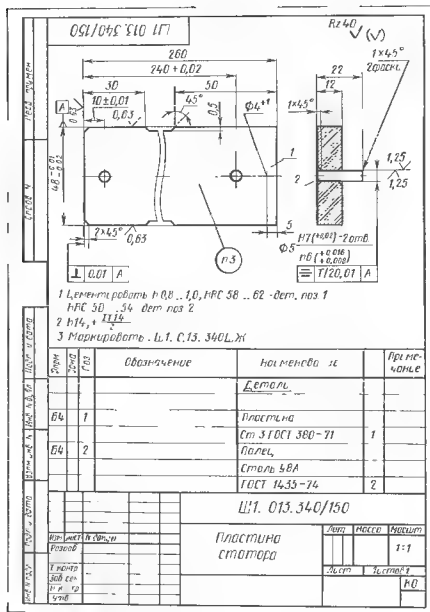


Рис. 2.6. Фрагмент конструкторской документации

роЙств и элементов САУ. Эти испытания осуществляются на заводе и предназначены для проверки функционирования САУ и всех ее характеристик после сборки и стыковки устройств системы в заводских условиях. Аналогичные испытания проводятся по каждому из устройств САУ. Для САУ на этом этапе важнейшее значение имеет соединение (стыковка) отдельных устройств. Сложные САУ пущаются в совместных испытаниях входящих в них устройств, так как эти устройства проектируются и изготавливаются на разных предприятиях (для САУ ЛА, например, это навигационные приборы, БЦВМ, гидроприводы; для САУ турбогенератора - электрические машины, микропроцессоры, насосы, сервоприводы). Такие испытания, называемые также *межведомственными*, служат для выявления работоспособности САУ в целом, установления соответствия ТЗ стыковочным характеристикам устройств САУ, локализации мест неисправностей и т. д.

Протоколы заводских испытаний входят в техническую документацию проекта.

Завершают этот этап натурные испытания САУ. Так как при всех перечисленных видах испытаний не удается воспроизвести реальную обстановку эксплуатации САУ (полет ЛА, работу ТГ в городской сети и т. д.), то во время таких испытаний, проводимых специальной комиссией с участием заказчика и государственной приемки, САУ работает в тех же условиях и на тех же объектах, для которых она проектируется (полет опытного самолета, движение шагающего робота по полной программе, работа ТГ под нагрузкой и т. д.). Протоколы результатов натурных испытаний являются одним из основных документов проекта. В процессе серийного производства и эксплуатации САУ она подвергается также периодическим контрольным и регламентным испытаниям для установления ее работоспособности и прогнозирования возможных дефектов на заданный период работы. По результатам всех видов испытаний вводятся многочисленные «обратные связи» в процессе проектирования (см. рис. 2.4) — исправляется и корректируется техническая документация, отбрасываются неверные проектные решения. Испытания — весьма трудоемкий и дорогой этап проектирования, в котором помимо проектировщиков-испытателей «участвуют» контрольно-измерительная аппаратура, опытное производство и заводы-изготовители, специально создаваемые для испытаний подвижные объекты (ЛА, суда, колесные машины). После испытаний, если они прошли успешно, проект (вся техническая документация и опытные образцы САУ) поступает на серийное производство, на первых порах в основном мелкосерийное и среднесерийное.

Вся динамика описанного процесса проектирования отражается в соответствующем прохождении технической документации. ТЗ, поступающее «на вход» проектирующего предприятия, в результате процесса проектирования преобразуется «на выходе» в

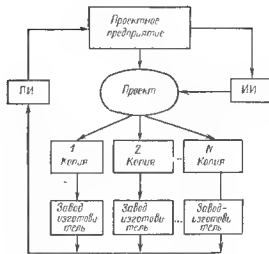


Рис. 2.7. Схема порядка документооборота;
ИИ — извещения об изменении; ПИ — предложения об изменении

проект, который обеспечивает серийное изготовление спроектированного объекта. Проект включает в себя техническую документацию, которая ориентирована на возможности конкретных заводов-изготовителей, не всегда совпадающие между собой. С учетом этого обстоятельства устанавливается единый порядок документооборота (рис. 2.7) между проектным предприятием и работающими по его документации заводами-изготовителями.

Проектное предприятие является держателем так называемого *подлинника проекта*. Взаимодействующие с ним заводы получают копии проекта, выполненные способом, гарантирующим совпадение с подлинником. Какие бы то ни было изменения проекта (а они в действительности происходят на протяжении всего периода изготовления изделия) могут быть проведены только на основании технического документа, выпускаемого предприятием-проектировщиком — извещения об изменении (ИИ), и осуществляется одновременно в подлиннике проекта и его заводских копиях. Основанием для выпуска ИИ может быть как инициатива проектировщика, направленная на улучшение проекта, так и предложение об изменении (ПИ), направляемое с той же целью заводом-изготовителем на проектное предприятие. Описанный порядок документооборота исключает возможность односторонней корректировки технической документации как проектировщиком, так и изготовителем. При этом условия обе стороны равно ответственны за выполнение требований ТЗ заводскими изделиями.

Таким образом, становится понятным одно из назначений САПР как инструментария проектировщика — избавить его от ру-

тинного, неквалифицированного, петворческого труда в процессе принятия проектных решений и выпуска технической документации, разумеется, соответствующей государственным и отраслевым стандартам. Последнее обстоятельство весьма существенно, так как именно выпуск документации составляет значительную долю трудоемкости проектов, загружающую квалифицированный персонал. Применение САПР, как будет показано ниже, открывает и принципиально новые возможности в организации документооборота между проектировщиком и изготовителем.

В соответствии с определением проектной процедуры каждая из них начинается с конкретного задания, исходных данных и заканчивается проектным решением, которое необходимо для продолжения процесса проектирования — «микроподъема по витку спирали». Множество проектных процедур образует некоторую динамическую структуру из последовательно и параллельно соединенных блоков с многочисленными обратными связями, суммирующими точками, аналогично структурной схеме из звеньев сложной САУ. Каждый блок такой схемы и носит название *проектной процедуры*, на которую отводится определенная *трудоемкость* работы проектировщика (обычно в человеко-днях), а также потребные ресурсы энергии, ЭВМ, станков, оборудования и т. д. Множество проектных процедур можно разделить на расчетно-теоретические, конструкторские, технологические. Подмножества расчетно-теоретические и конструкторские включают математические исследования и расчеты, конструкторско-графические и вычислительные процедуры по конструкторским расчетам, прорисовкам и изображениям устройств, блоков и элементов САУ. Подмножество технологических процедур содержит процедуры расчета и графического отображения режимов изготовления деталей, сборки и монтажа САУ и ее устройств.

В зависимости от находящихся в распоряжении проектировщиков объемов информации об объекте проектирования может быть проектирование:

только по известным проектным процедурам, в этом случае требуется только проверить пригодность типовых проектных решений требованиям ТЗ;

путем замены части известных проектных процедур на оригинальные;

полностью на новых — оригинальных — проектных процедурах.

Пример 2.2. Этапы и процедуры проектирования САР гиросtabilизированной платформы (ГСП). ГСП является распространением простейшего одноосного гиросtabilизатора (см рис. 1.2) на стабилизацию в пространстве платформы.

Объектом регулирования в этой САР служит (рис. 2.8) платформа 1, на которой расположены гироскопические чувствительные элементы (ЧЭ) Г-1, Г-2, Г-3, акселерометры 4, 6, 6, измеряющие линейные ускорения ЛА по осям ξ , η , ζ , оптический дегенератор 7. Чувствительные элементы на двухстепенных гироскопах Г-1, Г-2, Г-3 реагируют на возмущающие воздействия относительно осей

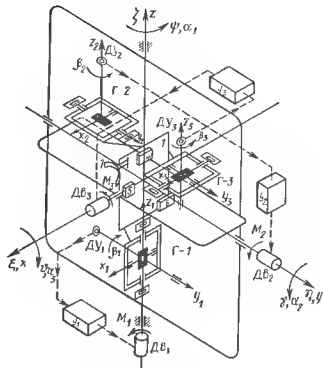


Рис. 28 САР гиросплатформы

вращения рамок карданова подвеса платформы, регуляторы через соответствующие датчики углов (ДУ-1, ДУ-2, ДУ-3), усилительно преобразующие цепи (У-1, У-2, У-3) и исполнительные устройства (двигатели с редукторами (ДВ-1, ДВ-2, ДВ-3) — удерживают платформу в заданном положении.

Для придания большей конкретности дальнейшему изложению рассмотрим гиросtabilизированную относительно инерциального пространства ГСП, помещенную в кардановом подвесе, который обеспечивает ей три степени свободы по углам ψ , θ , γ . Ось ψ — ось вращения — совпадает с наружной осью платформы и направлена по местной вертикали от центра Земли, ось θ — ось крена — совпадает с промежуточной осью подвеса, ось γ — ось тангажа — совпадает с внутренней осью подвеса и образует с осями ψ и θ правую систему координат. $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ — углы стабилизации, определяющие динамическую и статическую точность САР ГСП; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ — углы прецессии, измеряемые с датчиков углов чувствительных элементов и поступающие на вход усилительно-преобразующих устройств САР ГСП; M_1, M_2, M_3 — управляющие моменты, прикладываемые стабилизирующими датчиками к осям стабилизации.

Процесс проектирования САР ГСП (рис. 29) начинается с выбора функциональной и кинематической схем прибора и расчета его системы стабилизации. Эти проектные процедуры, осуществляемые на первых этапах проектирования, включая эскизный проект, строятся на основе опыта разработчика с привлечением макетирования прототипов будущего прибора. Структурная, функциональная и кинематические схемы ГСП выбираются исходя из требований ТЗ, как правило, по готовым прототипам. В последующем составляются математические модели динамики — уравнения движения ГСП, из которых после значительных упрощений выводятся приближенные расчетные формулы для оценок

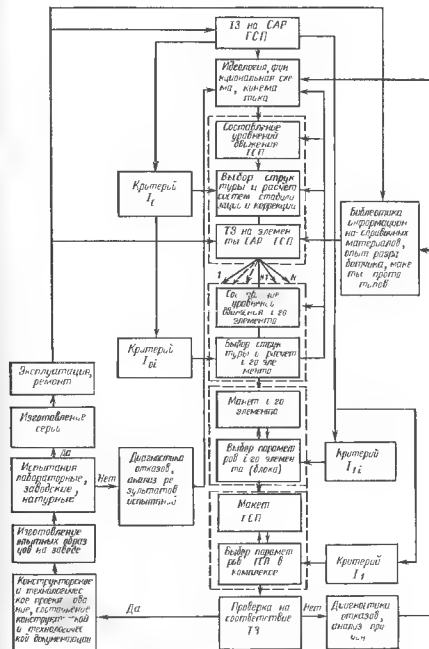


Рис. 29. Процесс проектирования ГСП

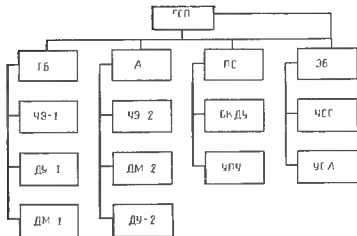


Рис. 2.10. Разбиение ГСП на основные компоненты

точностных, конструктивных и других характеристик ГСП. Для целей упрощения задачи осуществляется представление ГСП в виде трех одноосных систем, а затем производится расчет каждого одноосного тракта стабилизации по единой методике. Расчет каждого одноосного тракта стабилизации ГСП осуществляется методом логарифмических амплитудно-фазовых частотных характеристик (ЛА ФЧХ).

В дальнейшем производится математическое моделирование и макетирование для подтверждения и уточнения предварительных аналитических расчетов. Оптимизация параметров производится, как правило, путем доводки характеристик прибора на макете. На последующих этапах проектирования осуществляется представление ГСП в виде сочетания блоков, узлов и элементов, на проектирование которых подготавливаются соответствующие технические задания (рис. 2.9).

На рис. 2.10 представлено традиционное разбиение ГСП на основные компоненты, которые разрабатываются отдельными подразделениями проектного предприятия. На рис. 2.10 обозначено: ГБ — прибор, включающий чувствительный элемент (ЧЗ-1), датчики угла (ДУ 1) и момента (ДМ 1);

А — акселерометр, включающий в себя чувствительный элемент (ЧЗ 2), датчик угла (ДУ-2), датчик момента (ДМ 2);

ПС — преобразователь сигналов, включающий в себя силовые косинусные датчики (СКДУ), усилительно-преобразующие устройства (ЧПУ);

ЗБ — электронные блоки, включающие в себя усилители и корректирующие устройства системы стабилизации ГСП (УСС), системы разгрузки акселерометров (УСА).

Дальнейшие проектные процедуры состоят в расчете, моделировании, конструкторской и технологической разработке, изготовлении опытных образцов и их испытаниях, проводимых вначале для отдельных компонентов ГСП, а затем для всей системы в целом.

На рис. 2.11 приведена схема взаимодействия проектных процедур при проектировании на этапах I — III (см. рис. 2.4) только одного устройства, входящего в САР ГСП — гироблока (ГБ). Внутри каждого звена схемы записаны: название проектной процедуры, трудоемкость ее выполнения в человеко-днях (в нижнем правом углу) и номер процедуры (в верхнем левом углу) в порядке ее выполнения. На вход каждой из процедур поступают исходные данные в основном в виде ТЗ — внутреннего для данного предприятия, а с выхода «спина»

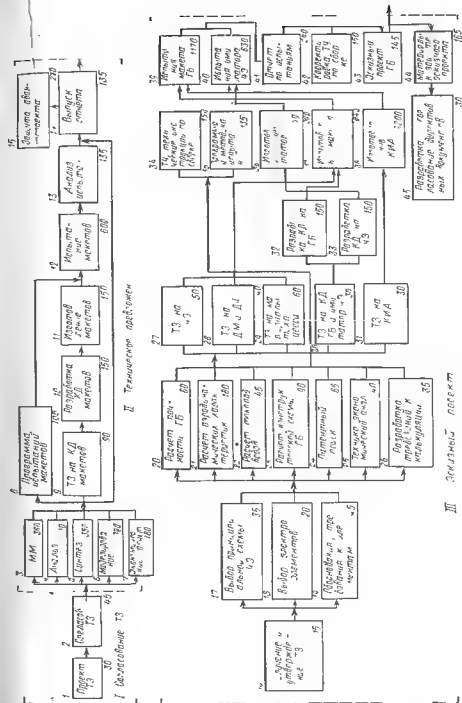


Рис. 2.11. Схема взаимодействия проектных процедур САР ГСП

мается проектное решение в установленной форме. Вход и выход проектных процедур на рис. 2.11 не показаны из-за громоздкости получившихся изображений.

Из этой схемы, а также из аналогичных схем IV—VII следует, что проектирование только одного ГВ состоит из более чем 160 проектных процедур с ориентировочными трудозатратами более 50 человеко-лет. Анализ этой схемы также позволяет выделить наиболее трудные проектные процедуры: изготовление КИА, разработка КД, построение ММ и др., а также узкие места прохождения во времени процесса проектирования.

Проведенный анализ процесса проектирования САР ГСП, а также изучение аналогичных процессов для других САУ позволяют перейти к решению одной из важнейших задач при создании САПР — выбору проектных процедур, подлежащих автоматизации. Для решения этой задачи необходимо формализовать процесс проектирования, составить его математические модели, с тем чтобы обоснованно и во взаимосвязи проводить автоматизацию проектных процедур.

§ 2.3. Модели процесса проектирования

Процесс проектирования может быть представлен различными моделями в зависимости от целей применения этих моделей, принятых форм или правил их построения.

В предыдущем параграфе уже были использованы такие формы моделей процесса проектирования, как словесная (описание этапов и проектных процедур и их взаимодействия), геометрическая — «спираль проектирования» (см. рис. 2.3). Эти модели, простые и удобные для предварительного анализа проектного процесса, нуждаются в уточнении при детальном изучении процесса проектирования перед началом его автоматизации, поэтому перейдем к представлению процесса проектирования математическими моделями, которыми удается достаточно строго его описать.

Процесс проектирования САУ, так же как и любых других технических схем, можно представить как систему проектирования (СП), объединяющую проектировщиков, инструменты проектировщиков, станочный парк, измерительные приборы, макеты, ЭВМ, комплектующие изделия и направленную на выпуск удовлетворяющей заводским требованиям технической документации на изготовление САУ в условиях заданных ограничений. К последним помимо указанных в § 2.1 можно отнести такие факторы, как связи с организациями-смежниками, традиции данной проектной организации и даже творческий стиль работы главного конструктора.

Построим математическую модель такой СП с позиций теории исследования операций*.

* Гермейер Ю. Введение в теорию исследования операций, М., 1971.

Под *операцией* в этой теории понимается совокупность действий, направленных на достижение искомой цели. В нашем случае глобальная цель проектирования — создание САУ, обеспечивающей управление объектом в соответствии с заданными требованиями, — определяется качеством выполнения проекта. Совокупность проектировщиков и инструментов проектирования в СП можно назвать *оперирующей стороной*.

Для достижения целей оперирующая сторона имеет в своем распоряжении ресурсы энергетические, финансовые, стапки опытного производства и т. д., которые называются *активными средствами*.

Способы действий с использованием активных средств называются *стратегиями оперирующей стороны*.

Представим качество проекта в виде функционала

$$W = F[f_1(z), f_2(z), \dots, f_n(z)], \quad z \in \{z_i\}, \quad i = \overline{1, n}.$$

где z — множество проектных решений, принятых при выполнении проектных процедур $\Pi = \{\Pi_i\}$, $i = \overline{1, n}$; F — принятый вид функционала качества проекта; $f_1, f_2, \dots, f_n$ — функции, представляющие частные критерии качества проекта, которые принимают конкретные числовые значения в зависимости от значений аргумента z .

Таким образом, если имеются конкретные проектные решения z^* (выбраны структурная схема САУ и состав ее устройств, составлены электрическая и монтажная схемы, выбраны конструкция и технологический процесс), то функции $f_1, f_2, \dots, f_n$ и функционал F примут конкретные числовые значения. Физический смысл функций $f_1, \dots, f_n$ в частности, может быть следующим: f_1 — трудозатраты на проект; f_2 — время выполнения проекта; f_3 — отклонение результатов от требований ТЗ к проекту; f_4 — количество изменений в технической документации из-за ошибок в ней, и т. д.

Напомним, что под функцией f понимают некоторое отображение $f: X \rightarrow Y$, устанавливающее однозначное соответствие каждому элементу множества X элементу множества Y . В частном случае, когда X и Y суть множества чисел, $Y = f(X)$ может быть представлена графиком на плоскости.

В том случае, когда множество X представляет множество функций, а Y — множество вещественных чисел, отображение $F: X \rightarrow Y$ называется функционалом. Так, например, когда оценивается общая стоимость проектных процедур в процессе проектирования, то она может быть выражена в виде функционала

$$W = F\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i f_i\right),$$

где α_i — цена нормо-часа i -й проектной процедуры Π_i ; f_i — планируемая трудоемкость Π_i .

Оперирующая сторона при достижении целей проектирования сталкивается с ограничениями: g_1 — допустимая стоимость проекта, g_2 — ресурсы проектного предприятия, g_3 — допустимое время проектирования, количество и состав комплектующих изделий и т. д., которым также можно придать формальный вид

$$G(g_1, g_2, \dots, g_m) \leq G_0.$$

Кроме того, оперирующая сторона помимо контролируемых, управляемых факторов, к которым относятся активные средства, вынуждена учитывать и неконтролируемые факторы, к которым в проектом деле относятся такие жизненные ситуации, как недопоставка комплектующих изделий и материалов, прогулы и опоздания сотрудников, выполнение проектировщиками сельскохозяйственных работ, принципиально неожиданные результаты при испытаниях, заранее не известная тактика действий заказчиков и отдельных групп проектировщиков при согласовании ТЗ и анализе результатов испытаний и многое другое.

Эти неопределенные факторы составят множество

$$\xi = \{\xi_k\}, \quad k \in \overline{1, M}.$$

Стратегией оперирующей стороны будет набор последовательности проектных процедур Π^* из всего множества их Π в условиях неопределенных факторов ξ . Таким образом, СП можно представить моделью вида

$$\left. \begin{aligned} W &= F[f_1(z), f_2(z), \dots, f_n(z)], \\ G[g_1(z), g_2(z), \dots, g_m(z)] &\leq G_0, \\ L\{\Pi_i | t, z_{i-1}(t - \tau_1), \xi(t - \tau_2)\}, i &\in \overline{1, N}, \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

где L — оператор выбора как самих проектных процедур Π_i , так и последовательности их выполнения (линейная последовательность, параллельное выполнение, комбинированное выполнение и т. д.); τ_1, τ_2 — неизбежные запаздывания во времени, необходимые на получение информации о предыдущем проектном решении z_{i-1} и неопределенных факторах ξ на обработку информации в проектной процедуре Π_i и принятие проектного решения z_i .

Выражения (2.1) математически отображают стремление СП к увеличению критерия эффективности своей деятельности в условиях помех и ограничений. Эти выражения с известной точностью заменяют физические процессы, происходящие в действительности. Исследователь имеет дело только с моделью (2.1), и установленные им критерии могут быть оценены только с точностью «до модели».

В простейшем случае — только типовых проектных процедур и представления функционала качества и ограничений только в

виде сумм — выражения (2.1) примут вид

$$\begin{aligned} W &= \min_z \left\{ \sum_{i=1}^n \alpha_i f_i(z) \right\}; \\ G &= \left| \sum_{i=1}^m \beta_i g_i \right| \leq G_0; \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$L\{\Pi_i | t, z_{i-1}(\tau_1), \xi(\tau_2)\} \quad \{\Pi_1 \rightarrow \Pi_2 \rightarrow \dots \rightarrow \Pi_N\},$$

где α_i — удельные трудозатраты в единицу времени на i -ю проектную процедуру; f_i — промежуток времени, отводимые на i -ю типовую проектную процедуру; β_i — заданные весовые коэффициенты; g_i — стоимость i -й проектной процедуры; G_0 — ограничение на стоимость проекта.

В том случае, когда все составляющие уравнений в (2.1) заданы, решение этих уравнений определяет наилучшую в смысле функционала качества W стратегию проектирования. Распространение модели (2.1) на проектирование САУ и ее устройств можно осуществить, если воспользоваться представлением иерархической структуры процесса проектирования всей САУ как сложной системы (СС) (рис. 2.12). Здесь устройства САУ представлены как отдельные системы, блоки этих устройств — как подсистемы, элементы блоков — как элементы подсистем.

Сложная система P включает в себя в виде элементов системы A_i :

$$P = \{A_j\}; \quad i \in \overline{1, J_n}; \quad A_i = \{B_{ij}\}; \quad j \in \overline{1, J_m};$$

$$B_{ij} = \{C_{ij}^s\}; \quad s \in \overline{1, J_s}.$$

В таком представлении СС можно отобразить ее топологию (рис. 2.12): $P = \{A_i\}$ связана с внешней средой, ее подсистемы и их элементы связаны между собой на каждом уровне иерархии. «Входом» СП САУ, представленной здесь как СС, является множество исходных данных — задание на проект V , «выходом» — проект R . Аналогично,

$$V_1, \dots, V_n; \quad R_1, \dots, R_n; \quad V_{11}, \dots, V_{1n}; \quad R_{11}, \dots, R_{1n};$$

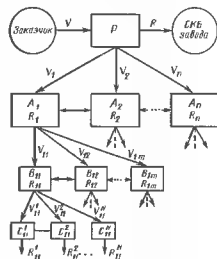


Рис. 2.12. Иерархическая структура проектирования САУ

являются «входами» и «выходами» для проектирования устройств, блоков и элементов САУ. На каждом уровне проектирования имеется «своя» структура и последовательность проектных процедур и, следовательно, создается «своя» стратегия проектирования при заданных ограничениях и целевой функции.

Применительно к структуре, представленной на рис. 2.12, выражения (2.1), сохраняя ту же форму, будут иметь разное содержание для каждого уровня иерархии. Так, для устройства A_1 (например, ГСП самолета) в первое уравнение системы (2.1) войдут функции f_1, f_2, f_3 , оценивающие трудозатраты, время разработки, требования ТЗ на ГСП самолета; во второе уравнение — ограничения по ресурсам, энергетике, транспорту и т. п. конкретного приборостроительного предприятия, специализирующегося на проектировании гироскопов, а в последнее уравнение — возможные стратегии назначения и распределения проектных процедур из известного их состава (см., например, рис. 2.11). Аналогично строятся модели (2.1) для блоков устройств B_n , которые проектируются вновь (например, специальные гироскопы для ГСП) и элементы этих блоков $C_{11}^n, \dots, C_{1N}^n$ (например, гироскопы для гироскопов ГСП).

Полученная таким образом для всех уровней СП САУ система из уравнений и неравенств (2.1) решается численными методами на ЭВМ. В результате получают стратегии проектирования для всех уровней СП САУ, отобранные в смысле критериев качества проекта W как наилучшие.

Математическая модель СП как «спирали проектирования» (см. рис. 2.3) представляется итерационным процессом, состоящим при выполнении отдельных проектных процедур из взаимодействия трех множеств: множества моделей $M = \{M_1, M_2, \dots, M_n\}$, множества операций над моделями $O = \{O_1, O_2, \dots, O_n\}$ и множества критериев проектирования $K = \{K_1, K_2, \dots, K_n\}$, где n — количество этапов проектирования.

Множество M включает в себя различные формы моделей проектируемых САУ (см. рис. 2.4) — математические (на первых этапах проектирования), принципиальные схемы, чертежи, макеты, опытные образцы (на последующих этапах). Аналогичный круг понятий вкладывается в множества O и K . Напомним, что под операцией понимается часть проектной процедуры. Операция выполняется одним или группой проектировщиков. Выполнение операции составляет рабочее действие над моделью. Если M_n представляет выходную техническую документацию — проект, удовлетворяющий требованиям к этому проекту K_n , то процесс заканчивается передачей технической документации на завод-изготовитель.

В соответствии с существующими этапами проектирования САУ взаимодействие множеств M, O, K сводится к следующему.

Этап согласования технического задания представляется как взаимодействие множеств $M_2 = \{M_{21}, M_{22}, \dots, M_{2n}\}$, прототипов проектируемого прибора с множеством критериев K_2 , сформированных по данным технического задания (M_1, K_1), и O_2 операций, представляющих на этом этапе операции анализа прототипов (временной, статистической) при возмущениях, введенных в M_2 из данных технического задания. Конечным результатом этого этапа являются множества M_3 и K_3 , которые становятся исходными для следующего этапа.

Этап технического предложения (аванпроект) представляется как взаимодействие M_3, O_3, K_3 и заканчивается выдачей множества $M_4 = \{M_{41}, M_{42}, \dots, M_{4n}\}$, включающего в себя технические предложения по проекту (структурная и функциональная схемы, кинематическая схема, типы чувствительных элементов, типы двигателей, усилителей, преобразователей).

Этап эскизного проектирования представляется взаимодействием подмножеств составляющих множеств M_4, O_4, K_4 и заканчивается выпуском принципиальных схем, конструкций, методик, технических заданий на элементы, что составит множество M_5 .

Множество O_4 включает в себя помимо операций анализа операции синтеза, расчета, обработки, изготовления эскизной технической документации. Аналогично представляются этапы рабочего проектирования, изготовления опытных образцов, испытаний, изготовления рабочей документации для серийного производства. При этом изменяется лишь состав элементов соответствующих подмножеств M, O, K . Например, на этапе изготовления опытных образцов множество M_6 представляет собой документацию (чертежи, технологические карты и т. д.), полученную на этапе 5. Множество O_6 включает в себя операции по технологической подготовке производства, а также по изготовлению опытных образцов (фрезерование, сверление, термообработка и т. д.). K_6 включает предыдущие множества, а также технические критерии, реализованные в контрольно-измерительной аппаратуре. Взаимодействие подмножеств M_6, O_6, K_6 осуществляется как от этапа к этапу, так и внутри каждого этапа.

Весь процесс проектирования представляется состоящим из проектных процедур $\Pi = \{\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_N\}$. Каждая проектная процедура $\Pi_j = \langle O_j, M_j, K_j \rangle$ переводит модель проектируемого объекта в следующее состояние:

$$\Pi_j : M_1 \rightarrow M_2, \Pi_2 : M_2 \rightarrow M_3, \dots, \Pi_N : M_N \rightarrow M_{N+1}. \quad (2.3)$$

При этом должны выполняться условия

$$\forall M_j \in M \exists \Pi_j : M_j \rightarrow M_{j+1}, \text{ где } M_j \in M_{j+1}, K_j \in K_{j+1},$$

$$O_j \in O, j \in [\overline{0, N}].$$

Выполнение определенного числа проектных процедур Π_{ij} на i -м витке проектирования (см. рис. 2.3), достаточном для перехода на следующий виток, аналогично накоплению физическими объектами энергии для «качественного скачка» на более высокий уровень. Такое энергетическое соотношение можно представить в форме

$$\left[\mathcal{E}(\Pi_i) = \sum_{j=1}^{n_i} \mathcal{E}(\Pi_{ij}) \right] > \mathcal{E}(\Pi_i^0),$$

где $\mathcal{E}(\Pi_i^0)$ — энергия, необходимая для перехода на следующий виток; $\mathcal{E}(\Pi_{ij})$ — энергия, затрачиваемая на выполнение каждой j -й проектной процедуры на i -м витке.

Энергия может исчисляться в трудоемкости, отводимой на проектные процедуры (см. рис. 2.11).

Рассмотрим математические модели процесса проектирования, основанные на теории графов. Такие модели позволяют представить процесс проектирования САУ и ее устройств по этапам, осуществлять разделение (декомпозицию) этого процесса на обзорные и удобные для обработки части, проводить исследование и оптимизацию процесса проектирования, в частности по экономическим критериям.

Базирующаяся на теории графов система сетевого планирования и управления (СПУ) давно применяется на различных этапах подготовки производства и представляет собой совокупность различных методов и организационных мероприятий, обеспечивающих оперативное и координированное выполнение сложных комплексов работ. В такой модели, называемой *сетевым графиком*, рассматриваемый комплекс проектных процедур изображается в виде ориентированного графа, отражающего его логическую последовательность, взаимосвязь и длительность. Продолжительность проектной процедуры обычно выражается в единицах трудоемкости — человеко-днях. Важными характеристиками, необходимыми для проведения оптимизации сетевой модели, являются количество проектных решений, количество и состав технической документации, состав и объем ресурсов по каждой проектной процедуре. Главной характеристикой при оптимизации является директивный срок окончания проектирования САУ и ее устройств в целом или по отдельным этапам. Если дугами графа являются проектные процедуры, то его вершинами — их результаты: техническая документация, макеты и т. п. В процессе проектирования многие проектные процедуры выполняются одновременно, поэтому на сетевом графике можно выделить от начального события — начальной вершины ориентированного графа — до завершающего несколько цепочек (путей) последовательно взаимосвязанных проектных процедур. Путь, имеющий наибольшую продолжительность, является критическим ($L_{кр}$). Зная величину критического пути и близ-

ких ему подкритических путей, можно выбрать наиболее целесообразную стратегию проектирования по выбранному критерию — директивному сроку окончания проектирования, имеющимся в ограниченном количестве ресурсам и т. п.

Сетевой график характеризуется двумя группами параметров: параметрами событий (в данном случае получение проектных решений) и параметрами работ (в данном случае проектных процедур).

Параметрами событий являются:

— ранний из возможных сроков свершения i го события T_{pi} — срок, необходимый для завершения всех работ, предшествующих i -му событию, выбирается как максимальное значение из продолжительности всех путей L_{pi} , ведущих к данному событию:

$$T_{pi} = F(\bar{L}_{pi}), \quad i = \overline{1, n};$$

— поздний срок T_{ni} свершения i -го события определяется как разность между продолжительностями критического пути и максимального из последующих за данным событием путей:

$$T_{ni} = F(L_{кр}) - F(\bar{L}_{ni}). \quad (2.4)$$

Параметры работ:

— ранний срок начала работы $T_{pij} = T_{pi}$;

— поздний срок начала работы $T_{nij} = T_{ni} - t_{ij}$, где t_{ij} — продолжительность проектной процедуры, началом которой служит событие i , а концом событие j , $j = \overline{1, n}$;

— ранний срок окончания работы $T_{poij} = T_{pi} + t_{ij}$;

— поздний срок окончания работы $T_{noij} = T_{ni}$;

— полный резерв времени $R_{ij} = T_{noij} - T_{poij}$.

Пример 2.3. Рассмотрим построение сетевой модели для этапов разработки технического задания и составления технического предложения при проектировании отдельного блока САУ ГСП. В табл. 2.1 приведен перечень укрупненных проектных процедур для этапа разработки технического задания и составления технического предложения для проектирования ГБ, составленный на основе структурной схемы проектных процедур, представленных на рис. 2.11.

На рис. 2.13 приведен граф, построенный по данному перечню. В верхнем графе (в кружках) даны параметры событий: в верхнем секторе — номер события по списку, в левом — ранний срок свершения события, в правом — поздний срок свершения события, в нижнем — резерв времени события. Числа над связующими дугами обозначают длительность проектных процедур, а под дугами — порядковые номера процедур по табл. 2.1. Двойной линией обозначен критический путь, который проходит через события 0, 1, 2, 6*, 8, 8*, 9, 10, 10*, 11 и составляет 1965 чел-дл.

Параметры проектных процедур приведены в табл. 2.1.

Из приведенного примера видно, что наиболее целесообразно в первую очередь разрабатывать инструменты САПР по построению математической модели, моделированию в целях замены макетирования, анализа испытаний макетов.

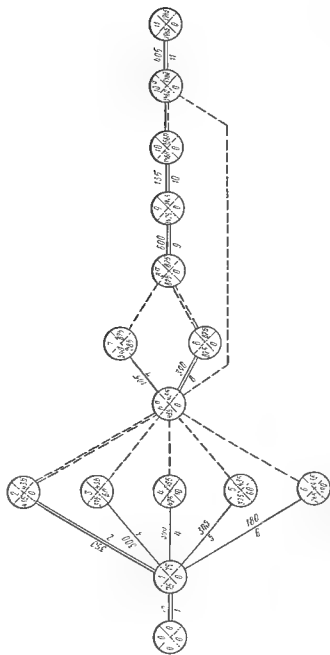


Рис. 2.13. Граф последовательности проектных процедур. Сплошными и прерывистыми линиями обозначены действительные и фиктивные процедуры соответственно, двойными линиями сплошными и прерывистыми — критический путь

Таблица 2.1

Шифр процедуры	Содержание процедуры	Продолжительность проектной процедуры, чел. дн	$T_{\text{вну}}$ чел. дн	$T_{\text{вну}}$ чел. дн	$T_{\text{вну}}$ чел. дн	$T_{\text{вну}}$ чел. дн	$T_{\text{вну}}$ чел. дн
0,1	Разработка и согласование проекта ТЗ	75	0	0	75	75	0
1,2	Разработка ММ	360	75	75	435	435	0
1,3	Проведение анализа . .	300	75	135	375	435	60
1,4	» синтеза	350	75	85	425	435	10
1,5	» моделирования	300	75	135	375	435	60
1,6	» экономических расчетов	180	75	255	255	435	180
6*,7	Разработка программы и методики макетирования	105	435	720	540	825	285
6*,8	Изготовление макета с предварительной разработкой ТЗ на КД . . .	390	435	435	825	825	0
8*,9	Испытание макета . . .	600	825	825	1425	1425	0
9,10	Проведение анализа испытаний	135	1425	1425	1560	1560	0
10*,11	Выпуск отчета	405	1560	1560	1965	1965	0

При большой размерности сетевого графика $n > 10^2 \div 10^4$ решение задач расчета и оптимизации возможно только на ЭВМ. В составе САПР необходимо иметь соответствующий инструмент проектировщика — расчетчика сетевых графиков.

§ 2.4. Анализ возможностей автоматизации процесса проектирования

Представленные в предыдущем параграфе математические модели процесса проектирования используются при анализе отдельных частей этого процесса — проектных процедур и операций — на предмет оценок возможности и целесообразности их автоматизации.

Прежде чем начать создание САПР или ее подсистем на конкретном предприятии, необходимо тщательное изучение процесса проектирования и его отдельных проектных процедур. Такое изучение (обследование предприятия по ГОСТ 23501.7-80) проводится с целью выделения из всего множества проектных процедур $\Pi = \{\Pi_i\}$, $i = 1, \bar{N}$, множества $\Pi^* \subseteq \Pi$, для которых разработка инструментов САПР эффективна. Каждая $\Pi_i \in \Pi$ занимает определенное место в маршруте проектирования, имеет на входе исход-

ные данные, а на выходе — проектное решение в виде проектного документа по ЕСКД и ЕСТД, которым либо заканчивается проект, либо он служит исходным для дальнейшего процесса проектирования. Выделение среди множества $\Pi \{ \Pi_i \}$ тех, для которых эффективно применение САПР, Π^* , проводится на основе модели процесса проектирования. В частности, по такой модели в форме графа или структурной схемы (см., например, рис. 2.11) составляются последовательность проектных процедур, подлежащих автоматизации, и основные их характеристики.

Анализ каждой из проектных процедур Π_i на целесообразность автоматизации производится по приближенным формулам

$$R_i(u_i) = \frac{t_{n,p,i}}{t_{n,n,i} + t_{n,p,i}};$$

$$R_{i,a,p}(u_i) = \frac{t_{n,n,i} + t_{n,p,i}}{t_{pi}}; \quad (2.5)$$

$$R_i(u_i) = 3(\Pi_i) N_i - 3(u_i), \quad i = \overline{1, n},$$

где $R_i(u_i)$ — оценка относительных временных затрат на выполнение проектной процедуры Π_i инструментом САПР u_i с учетом времени, расходуемого только на выполнение проектной процедуры $t_{n,n,i}$, и дополнительного (накладного) времени на подготовку исходных данных для этого инструмента $t_{n,p,i}$; $R_{i,a,p}(u_i)$ — оценка относительных временных затрат по отношению к «ручному» традиционному выполнению проектной процедуры Π_i с временем t_{pi} ; $R_i(u_i)$ — оценка выигрыша по затратам трудоемкости, выполнения проектной процедуры по отношению к традиционным методам $3(\Pi_i)$ с учетом трудоемкости изготовления инструмента САПР $3(u_i)$, N_i — число применений проектной процедуры Π_i в процессе проектирования.

Оценки (2.5) являются предварительными. Подробный технико-экономический анализ производится при создании и внедрении САПР как обязательный этап автоматизации проектирования.

Рассмотрим результаты общего анализа эффективности применения САПР в проектировании САУ. Автоматизация оказывается весьма эффективной при частичной или полной замене макетирования проектными процедурами, использующими САПР. При проектировании САУ макетирование начинают применять с первых этапов (см. рис. 2.4, 2.9), т. е. уже при согласовании ТЗ, и продолжают это применение до последнего этапа. Изготовление макетов устройств САУ — одна из наиболее трудоемких, длительных и дорогостоящих проектных процедур. Применение САПР САУ в этом случае сводится к математическому и полупатурному моделированию САУ вместо испытаний макетов и технологических образцов. Эффективность применения моделирования, понимаемого здесь как составляющая САПР — инструментария проектировщика, особенно заметна на первых этапах проектирования.

Следующей типовой проектной процедурой, на которой эффективно применение САПР, является *выбор наилучшего в смысле заданных критериев проектного решения*. Эта проектная процедура встречается на всех этапах проектирования САУ (см. рис. 2.4) и включает в себя решение задач анализа, синтеза, идентификации, расчета их элементов, в том числе конструкторского и технологического. Среди таких задач можно назвать разработку первоначального варианта структуры САУ, предварительный ее анализ по математической модели, расчет устройств САУ по готовой методике, синтез регуляторов. Особую важность приобретают такие проектные процедуры на первых этапах проектирования, так как они определяют весь последующий процесс и конечный результат.

Автоматизация конструкторской и технологической подготовки производства становится прерогативой САПР. Применение инструментов САПР в этом случае позволяет автоматизировать расчеты, получать техническую документацию на машинных носителях, освободить конструкторов, технологов и нормировщиков от многократно повторяющихся трудоемких проектных операций по расчетам и составлением многочисленных документов (технических условий, спецификаций, ведомостей деталей с различной обработкой). Основная задача в этом случае состоит в разработке формального представления типовых процессов для проектных процедур конструкторской и технологической подготовки производства.

Традиционно слабым звеном процесса проектирования является *сбор и хранение информации по предыдущим и текущим САУ как объектам проектирования*. Библиотеки каталогов, стандартов, описаний, схем, чертежей и т. д. весьма громоздки и требуют для своего функционирования специальных условий хранения и обслуживания; на поиск необходимой проектировщику информации он часто тратит до $1/3$ своего рабочего времени. Некоторые разновидности информации принципиально невозможно хранить и обрабатывать без ЭВМ (например, данные испытаний).

Задачи, которые решают средствами САПР в этом случае, следующие: хранение и переработка информации, трансляция описаний и технической документации с языка пользователя на машинный язык, организация баз данных моделей и их компонентов, каталогов, справочников, архива типовых решений и процедур, представление информации в удобной для проектировщика форме.

Основная задача построения этой подсистемы САПР САУ — создание банка данных с системой управления базами данных (СУБД).

Следующий важный этап, где САПР весьма эффективна, — это испытания. *Проведение испытаний САУ* в настоящее время уже невозможно без применения средств САПР. В соответствии

с программами испытаний САУ САПР должна обеспечивать решение следующих задач:

- формирование испытательных воздействий как детерминированных, импульсных и произвольной формы, так и стационарных и нестационарных случайных процессов с заданными вероятностными характеристиками;
- формирование программ управления испытаниями;
- обработку измерительной информации и определение точностных, динамических, энергетических и других эксплуатационных характеристик САУ;
- запоминание, хранение и выдачу выходной информации.

Наконец, нельзя не остановиться на одном из весьма «сперитных» аспектов процесса проектирования — *согласовании ТЗ между подразделениями НИИ и КБ*, которое из-за сложности и гетерогенности проектируемых объектов затягивается на весьма длительный срок. Применение САПР в этом случае позволяет формализовать и канонизировать неизменяемые части ТЗ, расширять информацию, включаемую в ТЗ, изготовлять ТЗ на машинных носителях. Перечисленные обстоятельства сокращают взаимные претензии согласующих сторон и повышают производительность этой важной процедуры проектирования.

Для иллюстрации рассмотренных в этом параграфе положений на рис. 2.14 показана структурная схема проектирования ГСП с применением САПР, в которой проектные процедуры макетирования, выбора структуры, параметров и др. (см. рис. 2.9) заменяют на выполняемые средствами САПР построение на ЦВМ математических моделей ГСП, анализ, синтез и т. д. Машинные модели, методы, алгоритмы, проблемно-ориентированные языки, пакеты программ и другие компоненты инструментов САПР, с помощью которых проектировщики выполняют эти и другие проектные процедуры, будут рассмотрены в следующих главах книги.

§ 2.5. Оценки технико-экономической эффективности автоматизации проектирования

Технико-экономическая эффективность автоматизации проектирования оценивается для определения целесообразности автоматизации проектирования на данном предприятии, сравнения с лучшими отечественными и зарубежными системами автоматизации проектирования. Эти оценки включают в себя эффект от создания и внедрения САПР не только в процессе проектирования в НИИ и КБ (см. рис. 1.5), но и в изготовлении на заводе и эксплуатации спроектированных с помощью САПР САУ и их устройств. Эффективность САПР складывается из многих факторов и источников; важнейшие из них приведены ниже.

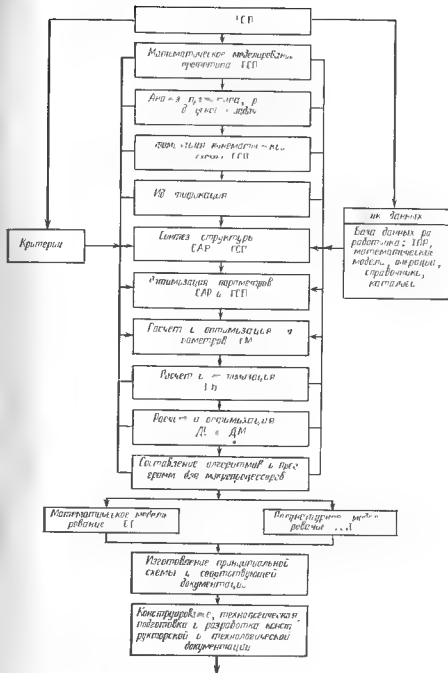


Рис. 2.14. Последовательность процедур проектирования ГСП с применением средств САПР

Оценка эффективности САПР
(% от общего эффекта от внедрения САПР)

Проектирование	30
В том числе:	
сокращение трудозатрат	10
рост производительности труда	8
повышение качества технической документации	12
Производство	50
В том числе:	
экономия материалов	23
сокращение трудоемкости	10
повышение качества изделий	12
сокращение расходов на складирование и транспорт	5
Эксплуатация	20
В том числе:	
сокращение эксплуатационных расходов	8
упрощение и облегчение эксплуатации	12

Характерным для оценки технико-экономической эффективности является то обстоятельство, что эффект от применения САПР складывается не только из непосредственных оценок каждого инструмента (2,5), но и из оценок процессов производства и эксплуатации изделия. Это объясняется повышением качества проектов и возможностью прямого выхода на гибкие производственные системы (ГПС) и создание на этой основе изделий, исключающих брак и облегчающих их эксплуатацию.

Основными факторами экономии являются:

при проектировании при помощи САПР — снижение затрат на проектирование в связи с сокращением сроков, увеличением качества расчетных и конструкторских работ, уменьшением числа макетов и опытных образцов, а также повышение качества проекта вследствие снижения ошибок в проектной документации;

при изготовлении объектов, спроектированных с помощью инструментов САПР, — сокращение длительности цикла производства, снижение материалоемкости, энергоемкости и потерь от брака изделий вследствие повышения уровня проектной документации, проектных решений;

при эксплуатации — повышение сроков службы изделий, спроектированных с помощью САПР, повышение их ремонтопригодности, сокращение числа отказов и численности работников, занятых обслуживанием и заменой оборудования.

Наряду с отмененными показателями эффективности САПР необходимо учитывать и такие социальные эффекты, как культура проектирования, демографические факторы, рынок сбыта и т. п. Однако создание инструментов САПР — длительный и трудоемкий процесс, в котором участвуют многие производственные коллективы и отрасли. Каждый инструмент САПР включает в себя семь компонентов, разработка и стыковка которых приводят к значительным затратам. Оценим затраты, путем анализа результатов разработки и внедрения САПР в промышленности на основе из-

вестных нормативных документов на создание САПР [8], ГОСТ 23501.0-79, 23501.14—81, 23501.15—81. Существенно то, что затраты на САПР носят разовый характер и окупаемость их будет тем выше, чем полнее, чаще и своевременнее используются инструменты САПР на практике.

Полные затраты $Z_{\text{САПР}}$ на создание САПР определяются по формуле

$$Z_{\text{САПР}} = Z_{\text{стр}} + Z_{\text{ин}} + Z_{\text{ЭВМ}} + Z_{\text{эксп}}$$

где $Z_{\text{стр}}$ — затраты на разработку структуры всей САПР и ее подсистем — инструментов проектировщика; $Z_{\text{ин}}$ — затраты на разработку определенного инструмента; $Z_{\text{ЭВМ}}$ — затраты на приобретение и установку ЭВМ; $Z_{\text{эксп}}$ — затраты на содержание и эксплуатацию САПР.

Затраты на разработку структуры САПР включают в себя: исследование проектного предприятия на предмет выявления составных частей процесса проектирования, подлежащих автоматизации, составление моделей процесса проектирования, декомпозицию этого процесса на этапы и проектные процедуры; выработку основных концепций и принципов создания САПР; построение структуры САПР и ее подсистем на данном конкретном предприятии. Эти работы проводятся разработчиками САПР высшей квалификации — главными конструкторами САПР и их ближайшими помощниками, составляющими главный конструктор. Затраты на разработку структуры можно представить формулой

$$Z_{\text{стр}} = K_{\text{разр}} T_n$$

где $K_{\text{разр}}$ — средняя тарифная ставка разработчика из главного конструктората; n — количество разработчиков; T — время разработки структуры (обычно от 0,5 до 1 года).

Затраты на каждый инструмент САПР состоят из стоимости технических средств, входящих в этот инструмент, заработной платы разработчиков его семи компонентов и машинного времени, затрачиваемого на отладку программ. Обычно каждый инструмент САПР разрабатывает «бригада» из 5-7 человек, которая включает в себя руководителя, как правило, «аналитика программиста», хорошо знающего как назначение инструмента, так и все его компоненты, его заместителя, системных и прикладных программистов.

Системные программисты разрабатывают управляющие и обслуживающие программы, которые обеспечивают функционирование инструмента САПР, его связь с пользователем, сервисное обслуживание последнего. Прикладные математики-программисты и проблемные программисты разрабатывают математические модели, методы, алгоритмы и строят на их основе «пакеты программ» — комплексы из отдельных программных модулей, связанных между собой, снабженных специальными проблемно-ориенти-

рowanными языками. Именно прикладные программы составляют основное ядро инструмента САПР, выполняющее проектные процедуры и операции.

Таким образом, затраты на i -й инструмент определяются формулой

$$Z_{\text{ин}i} = C_{\text{т.с.и}i} + K_{\text{разр.и}i} T_i N_i;$$

$$Z_{\text{ин}} = \sum_{i=1}^n Z_{\text{ин}i},$$

где $C_{\text{т.с.и}i}$ — стоимость технических средств, входящих в i -й инструмент; $K_{\text{разр.и}i}$ — средняя тарифная ставка разработчика i -го инструмента САПР; N_i — количество разработчиков; T_i — время разработки, обычно $T=2; 4$ года.

Затраты на ЭВМ

$$Z_{\text{ЭВМ}} = C_{\text{ЭВМ}} + C_{\text{уст}} + C_{\text{пп}},$$

где $C_{\text{ЭВМ}}$ — затраты на помещения для ЭВМ и стоимость ЭВМ; $C_{\text{уст}}$ — стоимость установки ЭВМ; $C_{\text{пп}}$ — стоимость пусконаладочных работ.

Затраты на эксплуатацию инструментов САПР

$$Z_{\text{эксп}} = C_{\text{обсл}} + C_{\text{рем}} + C_{\text{ам}},$$

где $C_{\text{обсл}}$ — заработная плата обслуживающего персонала; $C_{\text{рем}}$ — стоимость ремонта; $C_{\text{ам}}$ — амортизационные расходы.

Затраты на САПР, как правило, окупаются достаточно быстро. Срок окупаемости

$$T_{\text{ок}} = Z_{\text{САПР}} / \dot{Z}_{\text{год}},$$

где $\dot{Z}_{\text{год}}$ — годовая экономия, получаемая от использования САПР. Тогда коэффициент экономической эффективности вложений в САПР

$$E_{\text{эф}} = \dot{Z}_{\text{год}} / Z_{\text{САПР}}.$$

Внедрение САПР целесообразно, если $E_{\text{эф}} \geq E_0$, где E_0 — нормативный коэффициент капитальных затрат на внедрение САПР, принятый в данной отрасли. Так, для некоторых отраслей промышленности он принят 0,4. Составляющие, из которых складывается экономия от внедрения САПР, уже были проиллюстрированы. Суммарная экономия

$$\dot{Z}_{\text{год}} = \sum_{i=1}^7 \dot{Z}_i$$

включает в себя $\dot{Z}_1$ — экономию от снижения затрат за счет применения САПР на этапах проектирования; $\dot{Z}_2$ — то же, на этапах производства; $\dot{Z}_3$ — то же, на этапах эксплуатации.

Экономия $\dot{Z}_1$ рассчитывается по формуле

$$\dot{Z}_1 = \sum_{j=1}^n (C_{j1} - C_{j2}) Q_j,$$

где C_{j1} — себестоимость проектирования j -го объекта традиционными инструментами проектировщика в течение всего процесса проектирования; C_{j2} — себестоимость проектирования того же объема инструментами САПР; Q_j — относительный годовой объем проектных работ j го объекта, выполняемых инструментами САПР; n — количество одновременно проектируемых объектов на предприятии.

Себестоимость C_{j1} задается по известным на каждом предприятии нормам.

Себестоимость C_{j2} рассчитывается по формуле

$$C_{j2} = \sum_{i=1}^N C_{ij2} T_{ij},$$

где C_{ij2} — себестоимость 1 ч работы проектировщика (по i -му элементу j -го объекта проектирования с учетом затрат на эксплуатацию соответствующего инструмента САПР); N — количество элементов; T_{ij} — время, затрачиваемое на i й элемент объекта проектирования.

Аналогичным образом строятся расчетные формулы для $\dot{Z}_2$ и $\dot{Z}_3$.

В заключение приведем экономические оценки по некоторым устройствам и элементам САУ.

Таблица 22. Оценка «трудоемкости проектирования асинхронного электродвигателя типа АД

Название характеристик проектных процедур	Проектирование	
	традиционными инструментами	инструментами САПР
Количество расчетов: поисковых поверочных	600 —	600 600
Время выполнения расчетов: поисковых поверочных	31 день —	3,3 ч 0,01 ч
Общая трудоемкость для всех расчетов	9180 чел-дн	456 ч
Количество комплектов чертежей	100	100
Количество конструкций	235	235
Время разработки одной конструкции, дн	35	6
Трудоемкость на всю серию чертежей	47 875 чел-дн	2375 чел-дн

В табл. 2.2 приведены примеры оценок стоимости расчетов и конструирования наиболее распространенных элементов САУ — электродвигателей типа АД общего применения, проектируемых средствами САПР, разработанными ВНИИЭМ в Москве*. Эти расчеты наглядно иллюстрируют эффект от внедрения САПР.

В табл. 2.3 показаны результаты расчетов затрат времени и средств на выполнение некоторых проектных процедур при проектировании планера самолета, объекта управления САУ ЛА, средствами САПР фирмы «Рокуэлл»**.

Таблица 2.3. Оценка времени и стоимости при проектировании планера самолета

Название проектных процедур	Проектирование традиционными инструментами		Проектирование инструментами САПР	
	время выполнения, ч	стоимость, долл.	время выполнения, ч	стоимость, долл.
Формирование геометрии крыла	0,5	17,5	0,1	0,6
Определение размеров и вычерчивание двигателя	1,5	52,5	0,05	0,3
Компоновка кабины экипажа	1	35	0,1	0,6
Расчет объемов топливных баков	1,5	52,5	0,2	1,2
Компоновка шасси в убранном состоянии	0,5	17,5	0,4	2,4
Формирование уточненного чертежа крыла	20	700	0,1	6
Расчет веса и балансировка	4	140	0,5	3
Формирование чертежа электропроводки САУ самолета	100	3500	20	120

ГЛАВА 3

СТРУКТУРА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ САУ

§ 3.1. Концепция, принципы и их структурная реализация

Создание САПР во многом аналогично созданию САУ. В обоих случаях выбираются структура, состав основных звеньев, проводятся детальная разработка этих звеньев, проектирование, из-

готовление, выпуск соответствующей технической документации. Создание САПР проводится в соответствии с ГОСТ 24601 86 и включает в себя те же этапы, что и проектирование САУ. На создание САПР выдается ТЗ, включающее в себя те же разделы, что и ТЗ на любой объект промышленности.

На рис. 3.1 показан процесс создания САПР, из которого видно, что соответствующие этапы, полностью совпадают по названию и последовательности с аналогичными этапами создания любых других изделий промышленности, наполняются новым содержанием, характерным только для САПР и ее подсистем — инструментов проектировщика как нового продукта промышленного производства. Специфика этого нового промышленного продукта состоит прежде всего в том, что он содержит в значительной части программные и технические средства вычислительной техники наряду с такими обязательными составляющими, как математическое, организационное и методическое обеспечения. Техническая документация и опытные образцы инструментов САПР включают в себя такие специфические части, которые ранее промышленно не выпускались, к ним относятся: проектные документы по математическим, лингвистическим, программным и другим компонентам каждого инструмента САПР; проектно-сметная строительная документация на установку ЭВМ, документация на комплектующие изделия технических средств САПР и на вновь разрабатываемые технические средства, которых нет среди выпускаемых промышленностью; опытные образцы программ и пакетов программ и т. п.

Важнейшее значение для создания и функционирования САПР имеет выбор ее структуры на уровне подсистем — инструментов САПР и структуры подсистем на уровне компонентов, в них входящих. Подобно САУ, правильный выбор структуры САПР обеспечивает успешную эксплуатацию ее на конкретном предприятии.

Знание структуры САПР необходимо также пользователю-проектировщику. Допустим, проектировщик — молодой специалист, пришедший на проектное предприятие, получает задание на выполнение проектной процедуры. Зная, что для этого применяются инструменты САПР, он должен отыскать подходящий инструмент на соответствующей «полке» и определить связи этого инструмента с другими средствами САПР. Структура САПР является представлением таких «полок» с расположенными на них инструментами, их названиями, связями и реквизитами.

Существует несколько концепций создания САПР. Из них наиболее распространены полностью автоматические САПР и человеко-машинные системы. В результате предыдущих исследований по САПР САУ показано, что автоматическое проектирование САУ в обозримом будущем не представляется возможным ввиду гетерогенности и многозвучности процесса проектирования, большого

* Воскресенский А. П., Голицыны В. И., Кузнецов Б. И. и др. Проблемы развития САПР асинхронных двигателей/Автоматизация исследования и проектирования электромеханических систем. Труды ВНИИЭМ. 1985. Т. 79. С. 68-73.

** Raymer D. P. Computer Aided Aircraft Configuration Development System — AIAA Paper, 1982, № 79—0064.

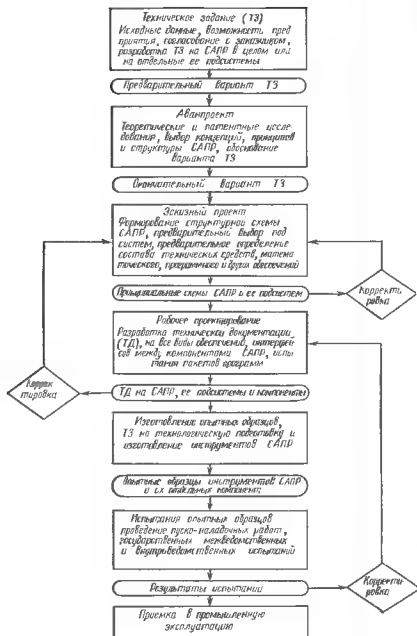


Рис. 3.1. Процесс создания САПР

числа неопределенных факторов, учет которых требует творческих способностей человека. Человеко-машинные системы автоматизации, в свою очередь, строятся на различных концепциях, в том числе на концепции разработки и внедрения САПР «сверху» как готовой системы вместо существующей традиционной системы проектирования; организации САПР только для информационного обслуживания проектировщика; создании САПР для выполнения только расчетных работ или только конструкторских работ. В соответствии с данным выше определением САПР и анализом процесса проектирования САУ (см. гл. 2) определим как основную концепцию САПР САУ в качестве инструментария проектировщика* (разработчика, конструктора, технолога и испытателя) и положим ее в основу формирования структуры САПР и ее отдельных подсистем. Исходным является положение о том, что каждое из проектных предприятий представляет собой отдельную систему проектирования, имеет свои традиции, обученные стабильные кадры, специфику предметной области. Поэтому важно осуществить **практический переход** от этих существующих систем проектирования к системам именно автоматизированного проектирования.

Перечислим вытекающие из этой концепции основные принципы построения САПР.

1. Стратегия разработки и внедрения инструментов (подсистем) САПР «инструмент за инструментом», при этом не дожидаясь того весьма отдаленного момента, когда САПР будет полностью создана и внедрена «сверху».

Так как разработка САПР проектного предприятия в соответствии с ее определением осуществляется с трудосложностью от 100 до 500 человеко-лет и не позволяет одновременно ввести в действие все подсистемы, то реальный выход видится в предложенной стратегии с предварительным выбором последовательности ввода инструментов по критерию их наибольшей эффективности на каждом промежутке времени.

2. Каждый из инструментов САПР должен занять свое место в структуре САПР предприятия.

Предварительное обследование проектного предприятия и полученные при этом модели взаимодействия проектных процедур (см., например, рис. 2.11) позволяют определить состав инструментов САПР. Как уже отмечалось, наиболее простой подход при этом, ведущий к 100%ной автоматизации проектирования, — «каждой проектной процедуре свой инструмент САПР». Однако этот идеальный случай практически нереализуем, так как существует **уровень сложности** некоторых проектных процедур, который не позволяет их автоматизировать имеющимися средствами (например, согласование ТЗ, выбор функциональной схемы ряда уст-

* Сольянцева Р. И. Система автоматизации проектирования — инструментарий проектировщика/ЭВМ в проектировании и производстве. 1983. Вып. 1.

роиств САУ, построение чувствительных элементов САУ ЛА, ГСП и ЦР). С другой стороны, существуют проектные процедуры, которые морально устарели и могут быть исключены из рассмотрения.

Отмеченные обстоятельства приводят к необходимости построения такой структуры САПР и ее отдельных подсистем инструментов, чтобы обеспечить автоматизацию наиболее важных проектных процедур и взаимосвязь инструментов САПР как на уровне их компонентов, так и на уровне самих подсистем.

3. Интеллектуальность и адаптируемость инструментов САПР являются неотъемлемыми их признаками.

Инструменты САПР в принципе интеллектуальны, поскольку они решают задачи, традиционно решавшиеся проектировщиками — работниками интеллектуального, умственного труда. По мере совершенствования средств САПР все большее число интеллектуальной работы проектировщика передается инструментам САПР; это построение математических моделей объектов управления, анализ, синтез, моделирование, трассировка соединений элементов САУ, экспертные подсистемы САПР. Современные инструменты САПР должны строиться таким образом, чтобы исключить традиционного посредника между проектировщиком и ЭВМ в виде математиков программистов, которые принимают задание от проектировщика, не подготовленного к работе на ЭВМ, реализуют его на ЭВМ и передают результаты проектировщику.

Быстрое изменение номенклатуры и условий функционирования объектов проектирования приводит к необходимости приспособлять инструменты САПР к возникающим вновь процедурам проектирования. Это свойство адаптации должно быть сразу же заложено в САПР и во все ее компоненты, особенно в математические методы, алгоритмы и системную часть программного обеспечения.

4. Множественность «входных» и «выходных» языков в инструментах САПР в соответствии с естественными языками и диалектами проектировщиков в их предметной области. Многоязычность является необходимостью, продиктованной самим процессом проектирования, в котором участвуют проектировщики различных категорий — «узкие специалисты» в своем деле: разработчики САУ и их устройств, конструкторы, механики, электроники, оптики; соответствующие специалисты по технологии, испытаниям, планированию проектного процесса. Каждый из них «работает на своем профессиональном языке», созданным в течение длительной истории соответствующего технического устройства и системы. По этому в соответствии с концепцией инструментария проектировщика каждый инструмент должен включать в себя как *обязательные компоненты языка проектирования* в его конкретной предметной области, иначе опять потребуются посредник между ЭВМ и специалистами по САУ и ее устройствам.

5. Информационное обеспечение САПР обязательно включает в себя динамические модели движения проекта от согласования ТЗ до передачи его на завод изготовитель, в том числе всю справочную, нормировочную и другую информацию, необходимую для выполнения проектных процедур. Поэтому каждый инструмент САПР своим соответствующим компонентом «подсоединяется» к информационному обеспечению для получения от него необходимых для выполнения проектной процедуры данных (типовых проектных решений, данных ГОСТ, ОСТ и нормалей, результатов испытаний и т. д.) и для помещения в этот «банк» проектных решений и других данных, полученных в результате выполнения i -й проектной процедуры $P_i \in \Pi$.

6. Среди инструментов САПР САУ важное место занимают инструменты разработчика программ — инструментальные системы программирования, служащие для разработки нового для промышленности продукта программных средств, причем это в равной мере относится как к программам, реализуемым на элементах САУ — мини и микропроцессорах (МКП), так и к программному обеспечению САПР.

7. Для выполнения сложных проектных процедур из отдельных инструментов строятся составные инструменты САПР. Такие составные инструменты становятся необходимыми при выполнении проектных процедур, эквивалентных макетированию. Например, составной инструмент «построение математических моделей» — «моделирование» позволяет проектировщику проигрывать интересующие его ситуации на модели так же, как он это делает на макете. Составные инструменты требуются при конструкторском проектировании. Объединяя, например, инструмент трехмерного изображения конструкторского блока с инструментом конструкторских расчетов его на прочность, упругость, устойчивость к различным возмущениям, получаем «составной инструмент» конструктора.

8. САПР САУ строится как система, предоставляющая проектировщику инструменты на всех этапах проектирования, а это значит, что функционально осуществляется инструментальное обеспечение: разработчика при выполнении им проектных процедур выбора прототипов проектируемой САУ и ее устройств, составления математических моделей, анализа, синтеза САУ, выпуска принципиальной схемы, испытаний САУ; конструктора, осуществляющего проектные процедуры выбора конструкций всей системы, ее устройств и элементов, детализовку, расчет жесткостей, моментов инерции, динамической податливости, конструкторские испытания; технолога и испытателя, выполняющих соответствующие проектные процедуры.

9. При построении структуры САПР должны учитываться: максимальная типизация проектных решений; изменение традиционных форм документов, функциональных обязанностей проек-

тировщиков, обучение их применению ЭВМ и машинных методов; автоматизация документооборота; согласованность пропускной способности предыдущего и последующего звеньев процесса проектирования; однократность ввода исходных данных.

10. Обеспечение функциональной и структурной гибкости САПР заключается в выборе таких ее структурных решений, которые обеспечивали бы возможность дальнейшего эволюционного развития системы и ее адаптации к изменяющимся требованиям пользователя.

Перечисленные принципы определяют структуру САПР. Существует ряд структурных решений при построении САПР. Простейший подход при построении структуры САПР — отражение в ней схемы взаимодействия проектных процедур существующего процесса проектирования, при этом в случае идеального решения задачи автоматизации «каждой проектной процедуры своя подсистема, инструмент САПР» мы получим повторение схем, представленных, например, на рис. 2.9, 2.11.

В более реалистической постановке выделяются реально изготовленные типовые подсистемы инструменты САПР, которые группируются по категориям проектировщиков и этапам проектирования. Таких подсистем САПР значительно меньше, чем проектных процедур. Структура САПР САУ из типовых инструментов-подсистем, построенная указанным способом, представлена в табл. 3.1. В этой таблице каждой категории проектировщиков (разработчики, конструкторы, технологи, испытатели) соответствуют наборы инструментов на каждом из шести этапов. Помимо типовых инструментов САПР часто возникает необходимость в «специальных инструментах», которые определяют проектными процедурами, характерными для каждого проектного процесса конкретного предприятия.

Например, инструмент для проектирования ЛА «Расчет конфигураций и объемов топливных баков самолета» или инструмент для проектирования блоков БЦВМ «Трассировка межсоединений элементов БИС» характерны только для предприятий, проектирующих САУ ЛА и ЭВА. Дополнив специальными инструментами типовые, получим полную структуру САПР на уровне подсистем. Однако такая структура не содержит связей подсистем — инструментов — между собой и взаимодействия отдельных компонентов, из которых каждый инструмент построен. Последний недостаток можно исправить дополнив структуру на уровне подсистем (табл. 3.1) структурой на уровне компонентов. Такая структура для 1-го инструмента САПР представлена на рис. 3.2, а. На рис. 3.2, б, в представлены структуры инструментов «Построение математических моделей САУ», «Графическое и геометрическое представление конструкций блоков САУ».

Пользователь проектировщик имеет дело с физическими компонентами инструмента, терминалами проектировщика — входны-

Таблица 3.1. Структура САПР САУ из инструментов (подсистем)

№ этапов проектирования	Инструменты САПР САУ для проектировщиков			
	Разработчик	Конструктор	Технолог	Испытатель
I	Анализ прототипов Моделирование	Анализ прототипов	Анализ прототипов	ДМК Моделирование
II	Построение ММ Анализ Моделирование Расчет	Моделирование Конструирование устройств и элементов Формирование КД	Формирование ТД Моделирование	ДМК Моделирование Обработка
III	Построение ММ Анализ Синтез Моделирование Расчет Изготовление программной документации для МКП	Расчет и конструирование Формирование геометрических образов Изготовление КД	Технологический расчет Формирование технологических карт, маршрутных карт Изготовление ТД	ДМК Моделирование Обработка
IV	Моделирование Расчет Изготовление ТД	Формирование КД Конструкторские расчеты Изготовление ТД	Формирование ТД Технологические расчеты Изготовление ТД	ДМК Моделирование Обработка
V	Моделирование Расчет Изготовление ТД	Изготовление КД для серий Разработка текстовой документации Разработка программ документации	Формирование технологического процесса Изготовление постпроцессоров Изготовление опытных образцов	ДМК Моделирование Обработка
VI	Обработка Формирование возмущений Анализ	Анализ испытаний конструкций Обработка результатов	Обработка Анализ	ДМК Обработка

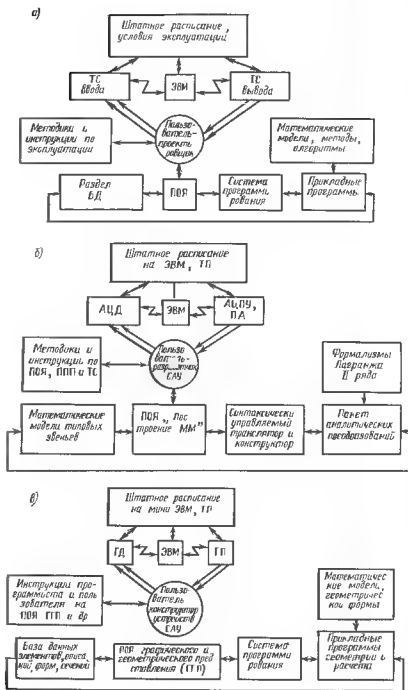


Рис. 3.2. Состав инструментов САПР САУ

ми и выходными устройствами ЭВМ (АЦД, ПА, ГП, АЦПУ и т. д.), проблемно-ориентированным языком (ПОЯ) для формулировки задания и получения результата и соответствующими компонентами методического обеспечения. Все остальные компоненты «спрятаны» внутри инструмента и обеспечивают его функционирование. Взаимодействие этих компонентов между собой обеспечивается специальными аппаратными и программными средствами (буферные устройства, препроцессоры, контроллеры, адаптеры, трансляторы и т. д.). Знакомство с этими средствами будет проводиться в следующих параграфах главы. Структура САПР будет не полной, если в ней отсутствуют «источники», из которых отбираются компоненты отдельных инструментов САПР — обеспечения САПР. Как уже отмечалось, существует семь видов обеспечения.

Структура обеспечений САПР САУ, построенная иерархическим способом, представлена на рис. 3.3. На этом рисунке приведены только три вида обеспечения, остальные представляются аналогичным образом.

Каждое из основных обеспечений САПР САУ строится как трехуровневая ветвь дерева. Так, на верхнем уровне ветви «Техническое обеспечение» размещается центральный вычислительный комплекс (ЦВК), осуществляющий переработку информации, поступающей от расположенных на втором уровне иерархии терминальных станций проектировщиков (разработчиков, конструкторов, технологов, испытателей). Терминальные станции проектировщиков (ТСП), в свою очередь, получают информацию от терминалов проектировщиков (ТП), установленных непосредственно на рабочих местах в каждой самостоятельной группе проектировщиков. На рис. 3.3 ТП разбиты по рядам проектировщиков: ТП разработчика — $ТР_1, \dots, ТР_n$, конструктора $ТК_1, \dots, ТК_m$, и т. д. ТП, оборудованные средствами автоматизации проектных работ (исследований, расчетов, изготовления проектной документации), служат для ввода — вывода информации и изготовления проектных документов после получения проектных решений. ТСП служат для оперативной переработки информации непосредственно от ТП и для взаимодействия с ЦВК в случае превышения возможностей ТСП, в том числе при работе в диалоговом режиме, переработке больших объемов информации в сжатые сроки (например, обработка данных натурных испытаний САУ).

Ветвь дерева САПР САУ «Программное обеспечение» включает в себя операционные системы (ОС) программирования на верхнем уровне иерархии, которые представляют собой совокупность системных программ, обеспечивающих освобождение человека от технической работы с машинными языками, распределением ресурсов ЦВМ, управлением внешними устройствами, редактированием, загрузкой данных в память ЭВМ и рядом других посреднических операций между человеком и ЭВМ. На следующем уровне

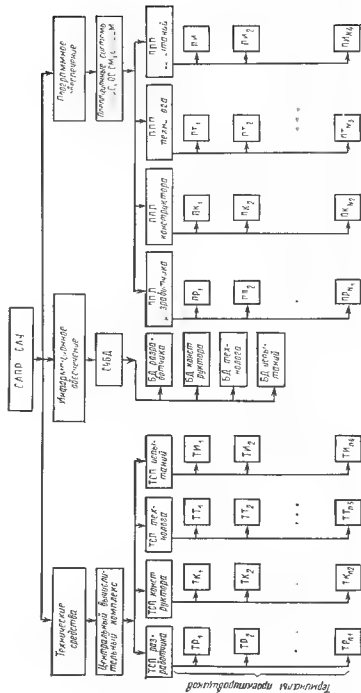


Рис. 3.3. Структура обеспечений САПР САУ

иерархии расположено прикладное программное обеспечение с системой управления пакетами прикладных программ (ППП). ППП — это комплекс программ, предназначенный для решения определенного класса задач проектирования, связанных между собой единой проектной процедурой (например, ППП построения математических моделей, ППП анализа, ППП компоновки узлов на чертеже и т. д.). Пакеты также разделены по принадлежности к различным категориям проектировщиков: разработчика, ПР₁, ..., ПР_n; конструкторов ПК₁, ..., ПК_n; технологов ПТ₁, ..., ПТ_n; испытателей ПИ₁, ..., ПИ_n. Аналогично на рис. 3.3 строится иерархическая ветвь информационного обеспечения САПР. На втором уровне этой системы находится СУБД — система управления базами данных (БД).

Перейдем к рассмотрению отдельных видов обеспечений САПР.

§ 3.2. Техническое обеспечение

Техническое обеспечение или технические средства (ТС) являются физическими носителями процессов ввода, вывода, обработки, визуализации и передачи информации при проектировании посредством инструментов САПР. Техническое обеспечение является наиболее подвижным из всех семи видов обеспечений САПР. Достаточно отметить, что обновление ТС происходит практически через каждые 3—4 года.

Причины построения САПР, сформулированные в предыдущем параграфе, определяют требования, предъявляемые к ТС: применение ТС непосредственно на рабочих местах проектировщиков;

- обеспечение наибольших удобств и наглядности работы проектировщиков, соответствующих инструментами САПР;
- возможность параллельной одновременной работы многих проектировщиков разных категорий над одним проектом;
- эффективность ввода, хранения и отображения проектной информации;
- высокая точность и скорость вычислений;
- совместимость с доступными ресурсами проектного предприятия (стоимость помещений, энергоресурсы и т. п.);
- выдача результатов проектирования в виде проектной документации, установленной ЕСКД и ЕСТД формы или непосредственно на технологическое оборудование, в том числе на станки с ЧПУ.

Чтобы удовлетворить этим требованиям, необходимо формировать наборы, комплексы из ТС, включающих центральный вычислительный комплекс (ЭВМ большой и средней мощности), терминальные станции проектировщиков (мини-ЭВМ), терминалы проектировщиков (микроЭВМ, АЦД, ГД, ГП, КГП, ПА и т. д.). ЭВМ большой и средней мощности типа ЕС-1045, ЕС-1066 в СССР

и CRAY I, CRAY II в США необходимы для решения больших задач (типа определения динамических характеристик ЛА на всей траектории полета), хранения и переработки проектной информации в течение всего процесса проектирования и т. д. ЭВМ типа ЕС (прототип IBM 360/370, США) применяются в промышленности СССР с 60-х годов, их структура и описание приводятся в соответствующих вузовских курсах. Мини-ЭВМ предназначены для решения массовых задач инженерно-технических расчетов и графических работ, сбора и предварительной обработки информации, управления и контроля терминалами и экспериментальными установками. Структура мини-ЭВМ во многом повторяет структуру больших и средних ЭВМ. Путем рационального выбора системы команд, снижения разрядности машинного слова, скорости выполнения операций, периферийного оборудования удалось создать класс ЭВМ с высокой надежностью, меньшей стоимостью и широкой доступностью для пользователей. Первые мини-ЭВМ типа RDP-8 появились в США в 60-е годы. В СССР мини-ЭВМ типа СМ выпускались, в частности, в серии СМ 4 и выпускаются в настоящее время в серии СМ-1420. В последнее время появились супермини ЭВМ типа VAX (США), которые превосходят по своим характеристикам не только мини ЭВМ, но и целый ряд ЭВМ средней производительности. В СССР супермини-ЭВМ выпускаются в серии СМ-1700.

МикроЭВМ — это класс ЭВМ на основе микропроцессора, построенного на нескольких больших интегральных схемах (БИС). Структурно микроЭВМ строится аналогично большим и мини-ЭВМ, но отличаются меньшей разрядностью, ресурсами памяти и конфигурацией периферийных устройств. На основе микроЭВМ создано несколько семейств персональных ЭВМ (ПЭВМ). Первые ПЭВМ появились на зарубежном рынке во второй половине 70-х годов (фирма «IBM» США). ПЭВМ фирмы «IBM» завоевали громадную мировую популярность и установили общепризнанные стандарты для производства ПЭВМ. Развитие ПЭВМ фирмы «IBM» охватывает два поколения. Первое поколение ПЭВМ содержит модели типа: IBM PC (август 1981 г.), IBM PC/XT (март 1983 г.), IBM PC/XT/370 (октябрь 1983 г.), IBM PC/AT (август 1984 г.), IBM PC/XT/AT/286 (август 1986 г.); второе поколение ПЭВМ IBM «персональную систему 2» (IBM PC/2) четырех моделей: модели 30, 50, 60, 80 (апрель 1987 г.), каждая из которых имеет несколько модификаций. В СССР аналоги ПЭВМ IBM начали выпускаться с 1986 г. В настоящее время в СССР силами совместных предприятий освоены серийный выпуск ПЭВМ ЕС1841 1850 типа IBM PC первого поколения.

В последнее время появились так называемые супермикро-ЭВМ, значительно превосходящие по своим характеристикам микроЭВМ и сопоставимые с мини-ЭВМ. Это обусловлено увеличением степени интеграции используемой элементной базы (БИС и

СБИС) и миниатюризацией ЭВМ. Представителем супермикро-ЭВМ является «MicoVAX-11» (фирма «DC», США).

Формирование структуры и состава комплексов из ТС сложная задача. Одним из подходов к ее решению является уже рассмотренный нами в § 2.4 способ на основе исследования операций и соответствующих ему формальных отношениях вида (2.1).

Пусть целевая функция по выбору ТС САПР имеет вид

$$W = \min_x \{F(f_1(X), f_2(X), \dots, f_n(X))\}, \quad (3.1)$$

где $X = \{x_i\}$, $i = \overline{1, m}$, — технические характеристики ТС, расположенных на каждом уровне иерархии (рис. 3.3) (быстродействие, объем оперативной памяти, надежность, стоимость, занимаемая площадь), $f_1, f_2, \dots, f_n$ — составляющие целевой функции (производительность, вычислительная мощность, пропускная способность, энергоемкость, эксплуатационная стоимость).

Соответственно уравнение ограничений запишем в форме

$$G(x_j) \leq G_0, \quad j = \overline{1, M}, \quad (3.2)$$

где x_1 — стоимость ТС, x_2 — занимаемые площади и т. п.

Для каждого набора $x_i \in X$ функции $f_i(X)$ и функционал W принимают конкретные числовые значения.

Отыскивая $W = \min\{F(f_1, f_2, \dots, f_n)\}$ при $G(x) \leq G_0$ одним из известных методов нелинейного или линейного (в случае $F(\cdot)$

$= \sum_{i=1}^N a_i f_i$ программирования, находим оптимальные $x_i \in X$, а по

ним из таблиц характеристик ТС, выпускаемых промышленностью, — подходящие ТС.

В простейшем случае система из выражений (3.1), (3.2) имеет вид

$$W = \min_{x_1} \left\{ \sum_{j=1}^N a_j f_j(x_1) \right\}; \quad (3.3)$$

$$G(x) = \sum_{s=1}^M \beta_s g_s(x_1) \leq G_0,$$

где a_j, β_s — весовые коэффициенты.

Функции f_j, g_s в (3.3) обычно строятся по экспериментальным данным. Так, например,

$$f_j(x) = x_1 x_2 \frac{1}{x_5} k_1, \quad (3.4)$$

где x_1 — быстродействие, тыс. оп/с; x_2 — объем ОЗУ, Мбайт; x_5 —

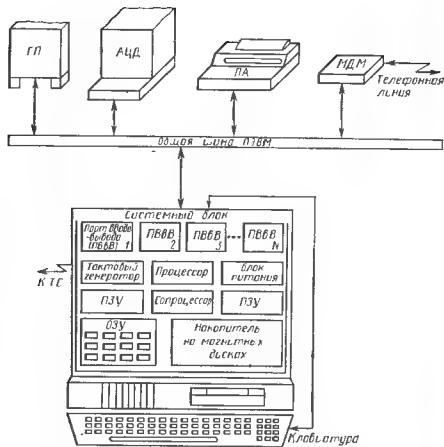


Рис. 3.5 Структура персональной ЭВМ

аппаратуру передачи данных и по телефонным каналам через модулятор-демодулятор (МДМ). Как видно из этого рисунка, мини-АРМ в миниатюре повторяет структуру АРМ более высокого уровня. Такой мини-АРМ занимает площадь не более 3 м² и потребляет около 1 кВт, в то время как, например, АРМ2-01 или АРМ2-02 занимает на ЭВМ типа СМ площадь более 20 м² и потребляет до 12 кВт. ТП на персональных ЭВМ удовлетворяют большинству требований, предъявляемых к ТП, они располагаются непосредственно на рабочем месте, настраиваются только на задания конкретного проектировщика и т. д. Однако надо иметь в виду, что ТП на персональных ЭВМ включает только по одному АЦД, ГП, ПА, АГД ограничены по точности вычислений, объемам внешней памяти, числу терминалов и ряду других характеристик, что не позволяет пока еще применять их для выполнения ресурсоемких проектных процедур.

Рассмотренные структуры технических средств показывают связи различных уровней по вертикали. При этом взаимодействие проектировщиков обеспечивается только через ЦВК на верхнем уровне или через отдельные ТСП на втором уровне (см. рис. 3.3). Остаются неиспользованными возможные связи между ТСП на втором уровне и ТП — на третьем, т. е. связи по горизонтали.

Этот недостаток исключается организацией вычислительных сетей из компонентов ТС САПР. В этом случае достигается выполнение требования по взаимодействию проектировщиков при работе над одним проектом, использование свободных ресурсов ТС, находящихся на одном уровне, достижение оптимальных связей между компонентами ТС, расположенных в различных помещениях одного или нескольких зданий, в условиях ограничений конкретной конфигурации проектного предприятия.

Существует два основных типа сетей на ЭВМ и их устройства:

— расширенные сети, предназначенные для соединения средств ЭВМ, установленных в центрах, удаленных друг от друга на расстояние до нескольких тысяч километров;

— локальные местные сети для соединения средств ЭВМ, установленные в одном здании или в соседних зданиях.

Для организации ТС САПР рассмотрим местные локальные сети*. Различают следующие главные структурные решения организации таких сетей: звезда, шина, кольцо и смешанная (рис. 3.6, а, б, в). На этом рисунке АП₁, ..., АП_N абонентские пункты, ТСП₁, ..., ТСП_N по-прежнему терминальные станции проектировщиков (в частности, АРМ). Распространение сетей на более низкий уровень приводит к организации связей между соответствующими терминалами проектировщиков. В этом случае вместо ТСП (рис. 3.6) помещаются терминалы проектировщиков (ТП).

Структура типа звезды наиболее традиционная, каждый компонент ТС САПР в ней соединяется с центральным процессором. Информация передается между двумя отдельными точками и всегда проходит через центральный процессор. Такая структура достаточно проста, однако введение любого дополнительного компонента ТС (АРМ, ТП) требует установления отдельной связи и ограничивает ресурсы центрального процессора.

Структура технических средств, представленная на рис. 3.3, построена на каждом уровне по типу звезды. Так как все ТСП связаны с центральной ЭВМ, то все ТП на третьем уровне связаны с соответствующими ТСП.

Структура типа общей шины (рис. 3.6, б) всю совокупность компонентов ТС присоединяет к общей физической линии связи. В этом случае любой сигнал, передаваемый от одной ТСП (ТП), одновременно принимается всеми. Подключение и отключение

* Ларцовая А. А., Майоров С. А., Новиков Г. И. Вычислительные комплексные системы и сети, Л., 1987.

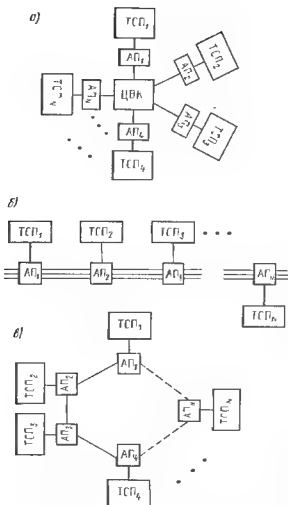


Рис. 36. Структуры организации сетей из технических средств САПР

ТСП (ТП) можно выполнять в любой момент не ограничивая производительность ЦВК.

Структура типа кольца (рис. 3.6, в) соединяет все компоненты так, что создается замкнутый контур. Эта структура является активной, т. е. сигналы повторяются при прохождении через каждый узел. В этом случае достигаются наивысшие скорости передачи данных, но в случае «обрыва» в кольце парализуется обмен информацией по всей сети.

Для соединения отдельных элементов сетей между собой применяются следующие аппаратные средства: телефонные линии

связи с применением модемов (модуляторов-демодуляторов цифрового сигнала, хорошо известных как элементы САУ); широкополосные линии связи с применением мультиплексоров — аппаратных средств для разделения во времени и по частоте сигналов, поступающих по каналам связи.

В качестве физического носителя для линий связи применяют телефонные кабели, коаксиальные кабели и волоконная оптика. Телефонный кабель является самым простым носителем и состоит из одной или двух пар электрических проводов. Допустимая скорость передачи колеблется от 50 бит/с до нескольких К бит/с на расстояния до 2 км. При увеличении скорости и расстояния происходит значительное затухание передаваемых сигналов. В то же время стоимость связей из телефонных кабелей намного ниже остальных.

При использовании коаксиального кабеля скорость передачи может достигать 100 М бит/с на расстоянии 1 км. Однако стоимость коаксиального кабеля значительно выше телефонного.

Передача по волоконно-оптическим каналам наиболее перспективна, ее скорость достигает 140 М бит/с на расстоянии 10 км. В то же время стоимость и сложность эксплуатации волоконно-оптических соединений высоки.

Обмен информацией между проектировщиками, работающими за ТП, соединенными в сеть, обеспечивается правилами, регламентирующими порядок во времени и приоритет доступа в сеть. Наибольшее распространение получили правила, построенные на предъявлении «пропуска» в сеть и на предварительном «прослушивании» сети. В первом случае ТП, обладающий пропуском, посылает в сеть запрос на выход и, получив разрешение, передает или получает информацию с передачей пропуска следующему ТП после окончания сеанса. Во втором случае ТП, желающий выйти в сеть, предварительно «прослушивает» ее, чтобы удостовериться, что никто в данный момент не ведет передачи, а затем выходит в сеть. Помимо перечисленных средств связи для успешной работы сетей ЭВМ в САПР необходимы аппаратура передачи данных (АПД) и абонентские пункты (АП), которые указаны на рис. 3.6. АПД преобразуют данные, поступающие с ТП и ТСП в сигналы, соответствующие типу и физическому носителю линии (каналу) связи; АП включает в себя помимо АПД дополнительные устройства телеобработки (мультиплексоры, коммутаторы, буферы устройств).

Определив таким образом структуру построения ТС, перейдем к выбору (он может проводиться по алгоритмам (3.4), (3.5)) компонентов ТС, подходящих для построения САПР САУ.

На основе расчетов характеристик ЦВК, ТСП (АРМ), ТП в табл. 3.2–3.7 приведены характеристики гипотетических технических средств, потребных для САПР САУ, и существующих, выпускаемых промышленностью СССР.

Таблица 32. Характеристики ЦВМ для выбора центрального вычислительного комплекса (ЦВК)

Серия	Тип ЦВМ	Среднее бы- стродействие, млн. оп/с	Объем опе- ративной па- мяти, Мбайт	Раз- ряд- ность, бит	Площадь для раз- мещения основного комплекс- а, м ²
ЕС ЭВМ «Ряд 2»	ЕС-1035	0,14—0,16	0,512	32	120
	ЕС-1045	0,54—0,88	1,024	32	120
	ЕС-1061	1,50—2,00	8,192	32	200
	ЕС-1065	4,00—5,00	16,324	32	350
ЕС ЭВМ «Ряд 3»	ЕС-1036	0,4	2,0—4,0	32	100
	ЕС-1046	1,3	4,0—8,0	32	100
	ЕС-1066	5,0	8,0—16,0	64	190
Многopроцессорные вычислительные комп- лексы (МВК)	«Эльбрус 1» (Э1-10)	12,0	8,0	72	1267
	«Эльбрус 2»	10,0—100,0	8,0—32,0	72	—
Характеристики, тре- буемые для ЦВК САПР САУ	—	>4	>8	>64	<100

Примечание. Более подробные характеристики ЦВМ можно найти в справоч-
нике: Вычислительные машины, системы, комплексы. Л. П. Зильбер, Л. А. Милос, Ю. П. Селиванов; Под ред. Б. М. Нартова, В. В. Пирайликовского. М., 1985.

Таблица 33. Характеристики базовых мини-ЭВМ для ТСП (АРМ)

Базовая ЭВМ	СМ 1420	СМ 1700	Характеристики, требуемые для САПР САУ
Среднее быстродействие, млн. оп/с	1	2	>2
Объем оперативной памяти, Мбайт	2	5	>4
Разрядность, бит	16	32	>32
Площадь для размещения основного комплекса, м ²	20	20—30	<20

Анализ технических характеристик ЦВМ, приведенных в табл. 3.2, по сравнению с техническими характеристиками, требуемыми для САПР САУ, показывает следующее: на сегодняшний день не существует ЦВМ, позволяющей в качестве центрального процессо-
ра реализовать все требуемые алгоритмы САПР САУ при суще-
ствующем их программном обеспечении. Так, для моделирования
ряда САУ в натуральном масштабе времени требуется быстродей-
ствие, превышающее приведенные в табл. 3.2 величины. Заметим,
что реальное быстродействие далеко не определяется количеством
выполняемых арифметических операций в секунду, так как,

Таблица 34. Характеристики ТСП и ТП на основе ЕС ЭВМ

Характеристики ТП					Характеристики ТСП				
Тип ТС	Количество на осно- вании использу- емой ТП	Макс. размер распреде- ленного устрой- ства управ- ления	Устройство управления в ТС	Автоматиче- ское управ- ление дис- плеем (АУД)	Печатающий аппарат (ПА)	Графический дисплей (ГД)	Читающий автомат (ЧА)	Кодировщик графической информации (КИИ)	—
I. Система отображе- ния алфа- витно-циф- ровой ин- формации ЕС-7970	1—32	200	ТС-7919 Скорость об- межа инфор- мации, К байт/с: с ТП — 10 по каналу — 170 размер символа 3,5×2,5 мм	ТС-7063 Размер экрана по диагонали 40 см, рабочее поле экрана 280×150 мм; число знаков — 128	ЕС-7077 Скорость печати 10 зп/с, число зна- ков в стро- ке — 128	—	—	—	—
II. Обраба- тывание кон- структур- ско-графиче- ской ин- формации ЕС-7941 (ЧСФР)	?	—	Мини-ЭВМ СМ-4	ТС-7168 Размер экрана по диагонали 28 см; рабочее поле экрана 200× 140 мм, число знаков 93; емкость экрана 16 строк× 80 зп	ТС-7186 Скорость печати 180 зп/с, число зна- ков в стро- ке — 130 мш 158	—	ЕС-7907 Дигитайр 1719—3,6 Г (1208—3,5 Г); рабочее поле 1682×1189 мм (1189×841) скорость вы- черчивания 250(400) мм/с, шаг записи, 0,01 мм	—	—
Требуемые характери- стики для САПР САУ	>100	>1000 м	Скорость обра- ботки инфор- мации, К байт/с: с ТП — 10	Число отобра- жаемых сим- волов 90—120; емкость экра- на 2000 знаков; кон. размер У5—5 мм; У5—5 мм	Скорость бо- лее 10 зп/с, число сим- волов в стро- ке 130—150	Размер ра- бочего поля 296×313 мм; количество адресных то- ков 1024× 1024	Размер рабо- чего поля от 226×313 до 618×875 мм; скорость на- черчивания >250 мм/с	Размер ра- бочего по- ля от 276× 313 до 618×875 мм; скорость на- черчивания шаг 0,1 мм	Размер ра- бочего по- ля от 276× 313 до 618×875 мм; скорость на- черчивания шаг 0,1 мм

Примечание. Описание ТС и ТП см.; Технические средства АСУ
Под ред. Г. З. Кеммса. Л., 1986.

Таблица 35. Характеристики персональных ЭВМ (ПЭВМ)

Тип ПЭВМ	Первое поколение				Второе поколение				Характеристики вычислительных ресурсов для САПР		
	IBM PC	IBM PCXT	IBM PCXT/386	IBM PCAT	IBM PC/AT ~386	IBM PC/2 «Монстр-30»	IBM PC/2 «Монстр-40»	IBM PC/2 «Монстр-50»		IBM PC/2 «Монстр-70»	IBM PC/2 «Монстр-80»
Среднее быстродействие, млн. оп/с	1	1,5	1,5	1,5	2	2	2	4	4	4—6	<1
Объем оперативной памяти, М байт	0,512	2	2	1—4	2—4	0,640—2,6	0,640—2,6	1—16	1—16	2—8	<2
Разрядность, бит	16	16	16	16	32	16	16	32	—	—	>16
Хронология выпуска ПЭВМ типа ЕС	IV кв. 1985 г.	I кв. 1987 г.	IV кв. 1989 г.	I кв. 1991 г.	IV кв. 1991 г.	—	—	—	—	—	

Примечание. Характеристики ПЭВМ можно также найти в кн.: Перспективы развития вычислительной техники. Справ. пособие. Н. А. Проскура, Н. В. Лещенко, Малые ЭВМ/Под ред. Ю. М. Смирнова. М.: Высш. шк., 1986.

Таблица 36. Характеристики универсальных АВМ и базовых АЦВК, построенных на их основе

Основные данные	Типы базовых АЦВК				Требуемые характеристики
	АЦВМС 2	ГВС-100	АЦВС-ЗЭС	АЦВК ЗЭС	
АВМ					
Тип	АВК-2	ГВС-102	АВК-32	АВК-32	—
Максимальное число АВМ, входящих в базовый АЦВК, шт.	4	7	4	6	—
Порядок решаемых уравнений	20—80	20—140	20—80	20—120	>52
Диапазон изменений переменных, В	±10	±10	±10	±10	±10
Длительность интегрирования максимальной	10 ⁴	—	10 ³	10 ³	10 ⁴
Полоса пропускания функциональных блоков, кГц	<0,5	2	5	5	>5
ЦВМ					
Тип	БЭСМ-3 (БЭСМ-6)	ГВС-101	ЕС ЭВМ «Ряд 2», «Ряд-3»		—
Быстродействие, млн. оп/с	0,02(1)	0,5	0,08—5,0		>0,02
Разрядность, бит	45(48)	36	32		>16
Объем ОЗУ, М байт	0,032 (0,512)	0,016 0,064	0,512 16,0		0,5
Аналого-цифровой преобразователь (АЦП)					
Тип	АЦВМ 2	ГВС-100(3)	АЦП БСК Блок АЦП УПС		—
Число каналов	32 272	16 32	48 96		>32
Напряжение на входе, В	±10	±10	±10		±10
Точность, %	0,05	0,01	0,02—0,04		0,05
Время преобразования, мкс	15	10	30 25		<10

Продолжение табл. 3.6

Основные данные	Типы базовых АЦВК				Требуемые характеристики
	АЦВМС-2	ГВС-100	АЦВМС-ЗЭС	АЦВК-ЗЭС	
Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП)					
Тип	—	ЦАП ГВС-100	ЦАП БСК	Блок АЦП УПС	—
Число каналов	32	16—32	20—80	32—192	>16
Напряжение на выходе, В	±10	±10	±10	±10	±10
Точность, %	0,05	0,01	0,02 0,04	0,25	<0,01
Время преобразования, мкс	5	2	30	15	<5
Занимаемая площадь комплекса (без учета ЦВМ), м²	25 50	50—60	25	30	30—35

Примечание. Описание АЦВК см.: Тетельбаум И. М., Шнейдер Ю. Р. Практика аналогового моделирования динамических систем. Справочное пособие. М., 1987.

Таблица 3.7. Технические характеристики трехступенных моделирующих стендов (ДМС)

Тип ДМС	Тип следящего привода	Максимальные углы прогибки по каждой из трех осей, град	Полоса пропускания частот, Гц	Угловая скорость, с⁻¹		Допустимая масса полезной нагрузки, кг
				max	min	
Стенды фирмы «Феккер»	Электрогидравлический	—	—	—	—	100
		—	—	2,6	7·10⁻⁴	
Стенд фирмы «Карко Электроника»	Электромеханический	—	4	—	—	50
		—	5 6	—	—	
ДМС I	Электромеханический	±90	10	1,7	10⁻⁵	100
		±90	10	1,7	10⁻⁵	
		±180	20	1,7	10⁻⁵	

Продолжение табл. 3.7

Тип ДМС	Тип следящего привода	Максимальные углы прогибки по каждой из трех осей, град	Полоса пропускания частот, Гц	Угловая скорость		Допустимая масса полезной нагрузки, кг
				max	min	
ДМС II	Электромеханический (с одной управляемой осью)	±180	20	1,7	10 ⁻³	100
		±90	—	—	10 ⁻⁶	
		±90	—	—	10 ⁻⁷	
ДМС III	Электромеханический	±360	3	5,2·10 ⁻³	1,1·10 ⁻⁵	100
		±60	4	1,7·10 ⁻³	3,5·10 ⁻⁶	
		±360	4,5	5,2·10 ⁻³	1,1·10 ⁻⁵	
Требуемые характеристики для САПР САУ ЛА		±180	≥20	≥3	2·10 ⁻⁷	≥100

Примечание. ДМС фирмы «Феккер» и «Карко Электроника» разработаны в конце 70-х годов в США, ДМС I, ДМС II — в год разработки и при участии автора в 1970 г. (ИФ ДМС III — в Томском политехническом институте Ю. М. Каченцевым, В. Я. Скорых и А. Н. Горюховым в 1976 г.; ряд ДМС разработаны фирмой «Бендиси».

например, для ЭВМ типа ЕС арифметические операции составляют меньшую часть общего набора операций. Поэтому практически имеет смысл говорить о среднем быстродействии для отдельных классов задач. Ряд ЦВМ требует программных средств повышения точности вычислений типа «doubleprecision», так как стандартная точность, аппаратно реализованная в ЭВМ, как правило, не удовлетворяет требованиям САПР САУ.

Большое значение имеет эксплуатационная надежность ЦВМ (так, по статистике оказывается, что только 50—70% времени работы машины идет на счет). Подходящими в настоящее время по указанным соображениям и в соответствии с расчетами по алгоритму (3.5) являются ЭВМ ЕС-1065, ЕС-1066.

Переходя к терминальным станциям проектировщиков (ТСП) и терминалам проектировщиков (ТП), следует напомнить, что при проектировании информация выдается средствами ЭВМ не только в числовой форме, но и в виде чертежей, графиков, листингов, протоколов, бланков.

Характеристики ТСП на АРМах и входящих в них ТП приведены в табл. 3.3 и на рис. 3.4, а ТСП на основе ЕС ЭВМ — в табл. 3.4. В зависимости от назначения ТСП и ТП выбирается их конфи-

гугация. В этом отношении ТСП, представленные в табл. 3.3, 3.4 и на рис. 3.4, позволяют строить различные конфигурации:

— для разработчиков — алфавитно-цифровые дисплеи, печатающие устройства;

— для конструкторов и технологов — алфавитно-цифровые дисплеи, графические дисплеи, графические построители, преобразователи графической информации в код;

— для испытателей наряду с дисплеями необходимо применять аналоговые ВМ, аналого-цифровые комплексы, динамические моделирующие стенды (АВМ, АЦК, ДМС).

Успехи в развитии многопроцессорных средств ВТ и терминального оборудования позволяют подойти к созданию специальных для САПР САУ мини АРМ на персональных ЭВМ (см. рис. 3.5) для разработки систем вычерчивания принципиальных схем, расчетов, составления и редактирования текстовых и графических документов, а также проведения широкого круга других проектных работ. В то же время решение задач проектирования часто не требует слишком высокой производительности вычислительных средств, что делает вполне приемлемым использование современных ПЭВМ, в частности ЕС-1841, ЕС-1850 (см. табл. 3.5).

При испытаниях САУ эффективным способом остается полунатурное моделирование с помощью динамического моделирующего комплекса (ДМК). В настоящее время методы и средства полунатурного моделирования получили узкоспециальное развитие. Не существует универсальных АВМ, АЦК, ДМС, одинаково пригодных для полунатурного моделирования различных систем. В частности, динамические моделирующие стенды (ДМС) для полунатурного моделирования САУ являются сугубо специальными и требуют особого рассмотрения (см. гл. 10).

В табл. 3.6, 3.7 приведены основные технические характеристики современных АВМ, АЦК и ДМС, применяемых в САПР САУ, и требования, предъявляемые к ним при испытаниях САУ.

Функционирование АЦК, ГД, ГП, КГИ, ПА, ДМС во многом строится на принципах программно управляемых сложных САУ. Элементами этих САУ являются типовые ЧЗ, датчики, исполнительные двигатели и т. д. Широко применяются в перечисленных устройствах электронно-оптические и другие преобразователи. Подробное описание структуры, блоков, функционирования перечисленных ТС САПР приведено в отдельных изданиях*.

§ 3.3. Математическое обеспечение

Математическое обеспечение САПР включает в себя математические модели объектов проектирования, методы и алгоритмы.

* См., например, Иванюк Е. Л., Степанов Н. М., Хомяков К. С. Периферийные устройства ЭВМ и систем. — М.: Высшая школа, 1987.

Раскроем понятия, введенные в этом определении. *Математическая модель* — это система математических соотношений: аналитических в виде уравнений, графических в виде структурных схем или графов, табличных в виде таблиц, описывающих изучаемый процесс или явление. Метод (греч. *methodos*) — путь исследования решения задачи, включающий в себя совокупность теории и приемов, содержащих логику и обоснование решения задачи. Из метода решения вытекают алгоритмы.

На математическом обеспечении как на фундаменте строятся основные компоненты САПР пакета прикладных программ (ППП). Представив весь объем работ по созданию ППП в виде пирамиды (рис. 3.7), на нижнем уровне разместим математические модели, методы, на следующем — алгоритмы, далее вычислительные алгоритмы, только на верхней ступени — программы. Составление программ представляет собой запись на принятом языке программирования вычислительного алгоритма. Достаточно опытный программист совмещает две верхние ступени пирамиды, разрабатывая удобный для него методом вычислительный алгоритм, а затем записывая его на алгоритмическом языке программирования ФОРТРАН, ПЛ/1, ПАСКАЛЬ и др.

Слово «алгоритм» (лат. *algorithmi* от арабской интерпретации имени узбекского математика IX в. Аль Хорезми) означает совокупность правил, определяющих процедуру решения задачи по заданным исходным данным, которая заканчивается результатом, решением.

Вычислительный алгоритм строится по известному алгоритму и представляет собой последовательность арифметических, логических и аналитических операций, составленных с учетом возможностей реализации на ЭВМ и оценкой погрешностей вычислений.

Составляющие математического обеспечения начнем рассматривать с математических моделей (ММ).

В САПР САУ математические модели являются необходимой составляющей для осуществления проектных процедур, состоящих во взаимодействии множеств M, O, K (см. § 2.4). ММ в большой степени определяют наиболее важные характеристики САПР САУ — время проектирования с помощью САПР, объем технических средств и обеспечений САПР, качество проектирования.

Математические модели САУ можно классифицировать по степени детализации САУ как сложной системы в соответствии с



Рис. 3.7. «Пирамида» из основных компонентов САПР

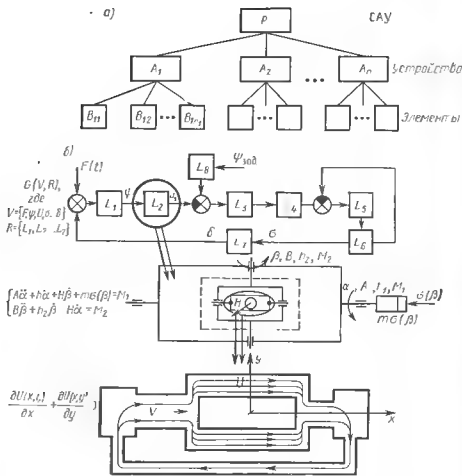


Рис. 38. Уровни классификации математических моделей САУ
а — иерархическая модель; б — модели структуры, устройства и элемента

трехуровневой иерархической схемой, представленной на рис. 3.8, а. Тогда выделяются следующие три уровня ММ:

ММ всей САУ как сложной системы P ;

ММ устройств САУ как отдельных систем A_i ;

ММ элементов этих устройств как подсистем B_{ij} .

На рис. 3.8, б для иллюстрации такой иерархии ММ показаны уровни и соответствующие формы ММ: для САУ ЛА, например, по каналу курса ψ (см. рис. 1.1); навигационного устройства этой САУ, гиросtabilизатора (см. рис. 1.2) и чувствительного элемента гиросtabilизатора — гироскопа с тироскопом на «газовом подвесе».

На самом верхнем уровне наибольшее распространение в теории САУ получили ММ в виде структурных схем и графов $G(V, R)$. Структурной схемой САУ называют ее графическое изображение в виде соединений звеньев. Звено обычно изображают в виде прямоугольника с указанием оператора, связывающего входные и выходные сигналы. Такими операторами являются (на рис. 3.8, а они обозначены $L_1 - L_7$ в соответствии с устройствами САУ ЛА) передаточные функции, дифференциальные и другие уравнения звеньев. Сравнивающие и суммирующие элементы структурной схемы отображают в виде круга. Полагая, что читатель достаточно осведомлен о правилах преобразования структурных схем САУ, представим рис. 3.9, а, б, на котором после выполнения соответствующих элементарных преобразований построены структурные схемы, соответствующие САУ ЛА по углу тангажа θ (на рис. 3.9, а $T_1 = T_2 = 1$) и САУ ТГ с указанием простейших математических моделей отдельных устройств — передаточных функций. На рис. 3.9, б отдельные звенья соответствуют САУ ТГ, описание которой приведено в примере 1.4 (см. номера звеньев на рис. 1.4 и 3.9, б). Причем рассмотрены два канала этой САУ: регулирование частоты вращения турбины (РЧВ) и регулирование давления пара (РДП). Из математических моделей, представленных на рис. 3.9 в виде структурных схем, видно, что они могут не соответствовать «естественному» разделению звеньев. Некоторые естественные звенья «математически» объединяются в одно, а другие, наоборот, разделяются. Так, устройства ТГ 4, 4' раскрывают более подробно. Это делается для удобства дальнейших исследований САУ уже по ее ММ, т. е. по некоторому абстрактному образу этой САУ. На основании структурных схем возможно построение алгоритмов, анализа и синтеза САУ с дальнейшей их программной реализацией на ЭВМ. При построении соответствующих инструментов САПР потребуется специальный проблемно-ориентированный язык разработчика САУ, на котором он будет производить необходимые операции со структурными схемами — определение передаточных функций разомкнутой и замкнутой цепей, преобразование многоконтурной цепи к одноконтурной, предварительные расчеты САУ. На основе структурных схем проводится исследование САУ в целом: формируются ее облик и функциональная схема, осуществляется выбор устройств.

Удобным для исследования отображением структурных схем САУ являются ориентированные графы, которые применительно к САУ обладают следующими свойствами:

— дуги графа изображают звено и характеризуются оператором этого звена — передаточная функция, уравнения звена;

— каждой вершине ставится в соответствие одна из переменных, и в соответствии с правилами работы с графами вершина, к которой подходит одна или несколько дуг, соответствует переменной, равной выходу одной дуги или сумме выходов дуг. Если

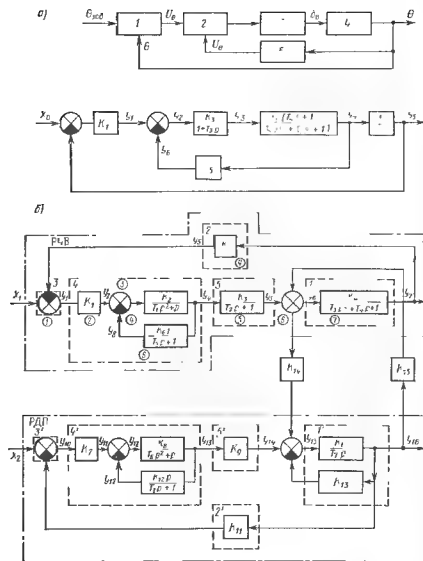


Рис. 39. Структурные модели САУ:

а — структурные модели САУ летательного аппарата; 1 — датчик угла тангажа; 2 — усилитель; 3 — топливная машина; 4 — пиллер, корпус самолета; 5 — датчик угловой скорости; б — структурные модели САУ турбогенератора

из вершины исходит несколько дуг, то входная величина для всех этих дуг одна и та же.

На рис. 3.10 показаны графы, построенные по структурным схемам САУ, приведенным на рис. 3.9. Правила работы с графами во многом сходны с правилами преобразований структурных

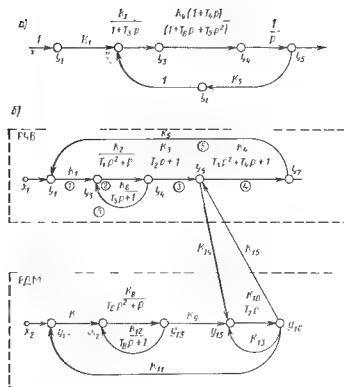


Рис. 3.10. Графы САУ самолета и турбогенератора

схем. Так, простой путь на графе, если нет не принадлежащих ему дуг, можно заменить одной дугой с передаточной функцией, равной произведению передаточных функций дуг этого пути. Параллельные дуги можно заменить одной дугой, равной сумме передаточных функций этих дуг. Определение передаточной функции САУ по ее графу можно выполнять пользуясь формулой Мейсона [16]:

$$W_{y,u} = \sum_{i=1}^m (W_i \Delta_i) / \Delta, \quad (3.6)$$

где W_i — передаточная функция i -го простого пути от вершины y_i к вершине y_u , равная произведению передаточных функций, входящих в этот путь; m — общее число таких путей; Δ — определитель графа;

$$\Delta = 1 - \sum_{j=1}^N W_j^{(1)} + \sum_{j=1}^N W_j^{(2)} - \sum_{j=1}^N W_j^{(3)} + \dots$$

где $W_j^{(1)}$ — передаточная функция j -го контура; N — количество контуров; $W^{(2)}$ — произведение передаточных функций, не касающихся, т. е. не имеющих общих дуг и вершин пар контуров; $W_j^{(3)}$ — произведение передаточных функций, не касающихся троек контуров, и т. д.; Δ_i — определитель подграфа, получающийся из исходного графа при удалении дуг и вершин i -го простого пути, а также всех дуг, инцидентных этим вершинам.

Перейдем теперь к «раскрытию содержания» операторов математических моделей описания САУ верхнего структурного уровня, т. е. к ММ устройств САУ (второй уровень иерархии ММ САУ, рис. 3,8, а).

Обобщенной формой ММ многих устройств САУ, а также объектов управления являются обыкновенные дифференциальные уравнения, в общем случае нелинейные, стохастические, с запаздывающим аргументом. Из этих уравнений как частные случаи получают линейные алгебраические, дифференциальные и другие уравнения.

Так, на рис. 3,8, б приведены линейные дифференциальные уравнения гиросtabilизатора с традиционными обозначениями: A, B — моменты инерции; I_1, I_2 — коэффициенты вязкого трения; H — кинетический момент гироскопа; α, β — углы стабилизации и прецессии.

В общем случае ММ устройств САУ можно представить в виде системы из обобщенных стохастических обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка:

$$F^*(\ddot{Y}, \dot{Y}, Y, X, U, \Lambda, t) = 0, \quad (3.7)$$

$$Y(0), \dot{Y}(0),$$

где при $t=0$, $Y(0)$, $\dot{Y}(0)$ — векторы из начальных условий случайных величин, $t \in [0, T]$; F^* — вещественная нелинейная вектор-функция своих аргументов; $F^* = (F_1^*, F_2^*, \dots, F_{n+1}^*)'$; $Y = (y_1, \dots, y_n)'$; $Y, \dot{Y}, \ddot{Y}$ — векторы из фазовых координат и их производных 1-го и 2-го порядков случайных функций времени; $X = (x_1, \dots, x_{n_2})'$ — вектор из возмущающих воздействий на систему — случайных функций времени; $U = (u_1, \dots, u_n)'$ — вектор из управляющих воздействий на объект управления — случайных функций времени. Такие уравнения обычно выводятся с помощью классических способов аналитической динамики (см. гл. 4).

Управляющие воздействия часто формируются в виде отдельных дифференциальных уравнений, связывающих векторы X, Y и U и их производные:

$$\Phi^*(\ddot{U}, \dot{U}, U, \dot{Y}, Y, X, t, R) = 0, \quad (3.8)$$

где $U(0)$, $\dot{U}(0)$ — начальные условия; Φ^* — вещественная нели-

нейная вектор-функция своих аргументов порядка n_3 ; $R = (r_1, r_2, \dots, r_{n_3})$ — вектор из коэффициентов, устанавливаемых при формировании управлений; $\Lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_{n_3})$ — вектор параметров — случайных величин. Параметрами ММ САУ будем считать составляющие коэффициентов дифференциальных уравнений, несущие определенный физический смысл (например, моменты инерции, коэффициенты усиления, постоянные времени).

В дополнение к перечисленным составляющим системы (3.7) будем считать заданными вероятностные характеристики случайных функций $X(t)$ и случайных величин $Y_0, \dot{Y}_0, U_0, \dot{U}_0, \Lambda, R, \xi[X(t)], \xi_0(Y_0), \xi_0(\dot{Y}_0), \xi(U_0), \xi(\dot{U}_0), \xi(\Lambda)$, которые в частных случаях выражают математические ожидания, дисперсии, плотности распределения вероятностей случайных величин.

Система (3.7), (3.8) является достаточно общей, и из нее можно получить обычно распространенные формы ММ устройств САУ как частные случаи.

Рассматривая промежутки времени $t_k - t_{k-1} \in [0, T]$, на которых случайные функции времени и случайные величины в (3.7), (3.8) можно заменить их математическим ожиданием (в дальнейшем для простоты будем рассматривать только уравнение (3.7)), систему (3.7) можно разбить на S подсистем с детерминированными аргументами функций F^* :

$$F_k^*(\ddot{Y}, \dot{Y}, Y, \tilde{Y}, X, U, \Lambda, t) = 0, \quad k \in [0, S]. \quad (3.9)$$

Положим для простоты дальнейшего изложения $F_k^* = F$ и приведем эту систему к нормальной форме. Для этого необходимо осуществить замену переменных $\tilde{Y} = Y_1$, $\dot{\tilde{Y}} = Y_2$, $\ddot{\tilde{Y}} = Y_3$ и $Y = (Y_1, Y_2)$ и разрешить систему (3.9) относительно старшей производной $\ddot{Y}$. Тогда получим нормальную форму нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\dot{Y} = F(Y, X, U, \Lambda, t) \quad (3.10)$$

с начальными условиями $Y(0)$, где $Y = (y_1, \dots, y_{n_1})'$, $X = (x_1, \dots, x_{n_2})'$, $U = (u_1, \dots, u_{n_3})'$, $\Lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_{n_3})'$, $F = (F_1, \dots, F_{n_1})'$ — соответствующие (3.10) векторы, $n_1 = 2n_1$. Система дифференциальных уравнений в форме (3.10) называется системой в форме Коши (А. Л. Коши — французский математик, 1789–1857). При дальнейшем упрощении уравнений (3.10) правые части в (3.10) заменяются на приближенные выражения

$$F_j(Y, X, \Lambda, t) \approx \sum_{i=1}^{n_1} a_{ij} \Delta y_i + b_{ij} \Delta x_j,$$

получаемые после линеаризации нелинейностей F_j относительно установившихся значений переменных Y_0, X_0 . При этом осуществляется известная замена $Y = Y_0 + \Delta Y$, $X = X_0 + \Delta X$, где Y_0, X_0 — ус-

становившиеся программные значения переменных, известные функции времени или постоянные величины, а $\Delta Y, \Delta X$ — малые отклонения в процессе движения. После такого упрощения получим распространенную форму — *линейные обыкновенные дифференциальные уравнения с постоянными или переменными во времени коэффициентами*

$$\Delta \dot{Y} = A^* \Delta Y + B^* \Delta \dot{X}; \quad \Delta \dot{Y} = A^{**}(t) \Delta Y + B^{**}(t) \Delta X, \quad Y_0, t \in [0, T], \quad (3.11)$$

где A^*, B^*, A^{**}, B^{**} — матрицы из коэффициентов a_{ij}, b_{ij} .

В некоторых случаях при описании САУ и их устройств применяется форма ММ вида

$$F(y_1^{(n)} y_1^{(n-1)}, \dots, y_1, X^{(m)}, X^{(m-1)}, \dots, X, u_1, t) = 0 \quad (3.12)$$

и происходящие от нее линейные относительно $y_1, \dots, y_1^{(n)}$ ММ

$$a_1(t) y_1^{(n)} + a_2(t) y_1^{(n-1)} + \dots + a_n(t) y_1 = -f(X^{(m)}, X^{(m-1)}, \dots, X, U, t); \quad (3.13)$$

$$a_1 y_1^{(n)} + a_2 y_1^{(n-1)} + \dots + a_n y_1 - f(X^{(m)}, X^{(m-1)}, \dots, X, u_1, t) \quad (3.14)$$

где $X^{(m)}, X^{(m-1)}, \dots$ — производные порядка $m, m-1, \dots$ от вектора X ; $a_1(t), \dots, a_n(t), a_1, \dots, a_n$ — переменные во времени и постоянные коэффициенты; u_1 — управляющее воздействие по координате y_1 .

Также ММ используются в том случае, когда при исследовании требуется определить процессы только по одной координате, в данном случае $y_1(t)$, а все остальные составляющие вектора $Y = (y_2(t), \dots, y_n(t))$ интереса не представляют.

Для удобства исследования устройств и САУ в целом на ЭВМ систему (3.7), (3.8) после линеаризации, аналогичной (3.11), представляют в форме

$$\dot{Z} = AZ + BU + DX, \quad Z(0) = Z_0, \quad t \in [0, T]; \quad (3.15)$$

$$\dot{U} = VU + KY, \quad Z = CZ,$$

где Z — вектор из координат «внутренних» состояний системы; U — вектор управляющих воздействий; Y — вектор «выходных координат»;

$$A = (a_{ji})^{n_1, n_1}, \quad B = (b_{ji})^{n_1, n_2},$$

$$D = (d_{ji})^{n_1, n_3}, \quad V = (v_{ji})^{n_2, n_2},$$

$K = (k_{ji})^{n_2, n_1}, C = (c_{ji})^{m, m}$ — прямоугольные матрицы коэффициентов при векторах Z, U , возмущающих воздействиях X , коэффициентов, формирующих законы управления САУ и связи векторов Y, Z . Как правило, рассматриваются случаи, когда матрицы A, B, C, D, V, K содержат только постоянные элементы. Уравне-

ния (3.15) получили распространение под названием формы пространства состояний.

Если функции $Y(t), U(t)$ и их производные, входящие в формы (3.7) — (3.15), в принципе имеют запаздывание $Y(t-\tau), U(t-\tau)$, то эти уравнения будут уравнениями с запаздывающим аргументом, отображающими, в частности, динамику гидравлических, пневматических и микропроцессорных элементов САУ.

Модели (3.7) — (3.15) служат основой для построения операторов L в ММ высокого ранга (см. рис. 3.8). В частности, из дифференциальных уравнений (3.15) получим

$$L(p)Y = G(p)U + R(p)X. \quad (3.16)$$

В этом операторном уравнении вектора Y, U, X те же, что и в (3.15), а $L(p), G(p), R(p)$ — операторы из полиномиальных матриц вида

$$(L_{ij}(p))^{n_1, n_1}, \quad (G_{ij}(p))^{n_1, n_2}, \quad (r_{ji}(p))^{n_1, n_3}, \quad p = \frac{d}{dt}$$

Из (3.16) в простейшем случае можно получить скалярное уравнение

$$\frac{y_1(t)}{x_j(t)} = W_{1j}(p) = \frac{r_{01} p^{n_3} + r_{11} p^{n_3-1} + \dots + r_{n_3 1}}{b_{11} p^{n_1} + b_{12} p^{n_1-1} + \dots + b_{n_1 1}}, \quad (3.17)$$

т. е. передаточную функцию — известный в теории САУ оператор.

Нелинейные дифференциальные уравнения также могут быть представлены в операторной форме. Так, уравнение (3.10) представляется в операторной форме на основе разложения выходной координаты Y в ряды Вольтерра. Для одномерного случая переменных y_i и воздействий U_j, x_j такое разложение после объединения $U_j(t)$ и $x_j(t)$ в одно возмущающее воздействие $x_j^*(t)$ имеет вид

$$y_1(t) = \int_0^t h_1(\tau_1) x_j^*(t - \tau_1) d\tau_1 + \int_0^t \int_0^t h_2(\tau_1, \tau_2) x_j^*(t - \tau_1) x_j^*(t - \tau_2) \times \\ \times d\tau_1 d\tau_2 + \int_0^t \int_0^t \int_0^t h_3(\tau_1, \tau_2, \tau_3) x_j^*(t - \tau_1) x_j^*(t - \tau_2) x_j^*(t - \tau_3) \times \\ \times d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3 + \dots$$

или

$$y_1(t) = \sum_{k=1}^N \int_0^t \dots \int_0^t h_k(\tau_1, \dots, \tau_k) x_j^*(t - \tau_1) \dots x_j^*(t - \tau_k) d\tau_1 \dots d\tau_k, \quad (3.18)$$

где $h_k(\tau_1, \dots, \tau_k)$ — обобщенные весовые функции исследуемой не-

линейной системы, получаемые после приведения исходного уравнения (3.10) к интегральной форме $Y \rightarrow \int_0^t F(Y, X, U, \Lambda, t) dt$ и применения к этой форме разложения Вольтерра;

$$h_j(\tau_1, \dots, \tau_k) = \sum_{i=1}^k a_{ij} \frac{(t - \tau_i)^{i-1}}{(i-1)!}, \quad a_{ij} = \frac{\partial^i F_j}{\partial y_i^i}; \quad x_j^*(t - \tau_i)$$

— значения входного сигнала, отстоящего (запаздывающего) от момента времени t на величину τ_i .

Формы ММ (3.7) — (3.18) являются достаточно общими для отображения различных устройств САУ. ММ непрерывных процессов в САУ и их устройствах описываются уравнениями (3.7) — (3.18) без каких-либо изменений. ММ дискретных устройств САУ получаются из уравнений (3.7) — (3.18) как частных случаев, когда функции в них определены только при $t_n = nT$, где T — такт дискретности по времени, а $n = 0, 1, 2, \dots$

В отличие от непрерывных ММ дискретные модели устанавливают соотношения между решетчатыми функциями

$$y(nT) = \Phi[X(nT)], \quad (3.19)$$

значения которых могут быть определены не в любой момент времени. Для решетчатых функций вводятся понятия квантования по времени (T) и квантования по уровню (Δ). ММ дискретных систем представляются в форме разностных уравнений. Переход от исходных дифференциальных уравнений к эквивалентным разностным можно сделать не единственным способом. В частности, полагая, в уравнениях (3.10)

$$t \rightarrow nT, \quad \frac{dY(t)}{dt} = \frac{\Delta Y(nT)}{T},$$

получим обобщенные разностные уравнения в векторной форме:

$$Y[(n+1)T] = Y(nT) + TF(Y(nT), X(nT), \Lambda, nT). \quad (3.20)$$

Напомним, что в общем случае разностное уравнение n -го порядка записывается при $T=1$ в виде

$$F(n, y(n), \Delta y(n), \dots, \Delta^k y(n)) = 0, \quad (3.21)$$

где под конечной разностью $\Delta y(n)$ понимается выражение

$$\begin{aligned} \Delta y(n) &= y(n+1) - y(n), \\ \Delta^2 y(n) &= \Delta y(n+1) - \Delta y(n) \quad \text{и далее} \\ &\dots \dots \dots \\ \Delta^k y(n) &= \Delta^{k-1} y(n+1) - \Delta^{k-1} y(n). \end{aligned}$$

Раскрывая эти выражения, получим

$$\begin{aligned} \Delta^2 y(n) &= y(n+2) - 2y(n+1) + y(n), \\ \Delta^3 y(n) &= y(n+3) - 3y(n+2) + 3y(n+1) - y(n), \\ &\dots \dots \dots \\ \Delta^k y(n) &= \sum_{i=0}^k \frac{k!}{i!(k-i)!} y(n+i) (-1)^{k-i}. \end{aligned} \quad (3.22)$$

После подстановки (3.22) в (3.21) приходим к разностному уравнению k -го порядка в форме

$$F(n, y(n), y(n+1), y(n+2), \dots, y(n+k)) = 0. \quad (3.23)$$

Если это уравнение удается представить в виде

$$y(n+k) = F_1(n, y(n), \dots, y(n+k-1)),$$

то, очевидно, задав начальные значения при $n=0$, $y(0)$, $y(1)$, ..., $y(k-1)$, мы получим y_k и вообще y_n при любом целом n .

Уравнение (3.23) представляет собой разностный аналог формы Коши (3.10) и позволяет рекуррентно (последующее значение $y(n)$ через предыдущее) вычислить все интересующие значения $y(n)$.

Возвращаясь к форме представления САУ в «пространстве состояний» (3.15), представим ее в конечно-разностном виде (3.23) другим способом. Решение первого уравнения из системы (3.15), можно записать в известной форме

$$Z(t) = e^{At} Z_0 + \int_0^t e^{A(t-\tau)} [BU(\tau) + DX(\tau)] d\tau. \quad (3.24)$$

Положим в этом уравнении $t_0 = nT$, $t = (n+1)T$ и рассмотрим промежуток времени $nT < \tau < (n+1)T$. Будем также считать, что $Z_0 = Z(nT)$, $U(\tau) = U(nT)$, $X(\tau) = X(nT)$. Тогда вместо (3.24), получим

$$\begin{aligned} Z[(n+1)T] &= e^{AT} Z(nT) + \int_{nT}^{(n+1)T} e^{A[(n+1)T-\tau]} [BU(nT) + \\ &+ DX(nT)] d\tau \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} Z[(n+1)T] &= e^{AT} Z(nT) + \int_{nT}^{(n+1)T} e^{-A\tau} d\tau BU(nT) + \\ &+ \int_{nT}^{(n+1)T} e^{-A\tau} d\tau DX(nT). \end{aligned} \quad (3.25)$$

Аналогично приводится к разностной форме второе уравнение системы (3.15), а третье уравнение примет вид $Y(nT) = GZ(nT)$. ММ в форме (3.25) применяется при исследовании как непрерывных, так и дискретных САУ и ее устройств.

Разностные уравнения, аналогичные формам (3.17), (3.18), можно представить в операторной форме. Так, если в уравнении (3.25) обозначить

$$\Phi_0(T) = e^{AT}, \quad \Phi_1(T) = \int_0^T e^{-A\tau} d\tau B, \quad \Phi_2(T) = \int_0^T e^{-A\tau} d\tau D$$

и ввести оператор сдвига $z = e^{pT}$, где p — оператор Лапласа, на основании известной в теории операционного исчисления теоремы умножения, то получим операторное уравнение в виде

$$Z(nT) = \Phi_0^*(z) U(nT) + \Phi_0^*(z) X(nT), \quad (3.26)$$

где

$$\Phi_0^*(z) = (Ez - \Phi_0(T))^{-1} \Phi_1(T);$$

$$\Phi_0^{**}(z) = (Ez - \Phi_0(T))^{-1} \Phi_2(T).$$

Из (3.26) в простейшем случае можно получить скалярное уравнение

$$\frac{z_l(nT)}{x_j(nT)} = \frac{a_{0l}z^n + a_{1l}z^{n-1} + \dots + a_{nl}}{b_{1j}z^m + b_{2j}z^{m-1} + \dots + b_{mj}}; \quad (3.27)$$

z — передаточную функцию — известный в теории САУ оператор, широко применяемый для анализа дискретных систем.

Таким образом, ММ (3.7) — (3.27) могут служить для решения задач в процессе проектирования устройств, соответствующих различным классам САУ: стохастическим и детерминированным, нелинейным и линейным, нестационарным и стационарным, непрерывным и дискретным.

Элементы САУ при первоначальном их получении описываются ММ на уровне представления физических явлений. Многообразие физических явлений, лежащих в основе многих элементов САУ, затрудняет построение каких-либо общих их ММ, поэтому рассмотрим некоторые типовые ММ, соответствующие частным случаям обобщенного дифференциального уравнения в частных производных второго порядка:

$$L(u) = a(x, y) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + 2b(x, y) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + c(x, y) \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \\ + 2d(x, y) \frac{\partial u}{\partial x} + 2e(x, y) \frac{\partial u}{\partial y} + g(x, y) u = f(x, y), \quad (3.28)$$

где $a(x, y)$, $b(x, y)$, $c(x, y)$, $d(x, y)$, $e(x, y)$, $g(x, y)$ — коэффициенты;

$f(x, y)$ — свободный член уравнения. Эти функции от независимых переменных x, y заданы в области D ограниченной контуром Γ ; $u = u(x, y)$ — искомая функция, которая может быть напряжением механического элемента, потоком газа или жидкости в пневматическом и гидравлическом элементах САУ. Уравнение (3.28) называют эллиптическим, параболическим и гиперболическим в зависимости от условий $R(x, y) < 0$, $R(x, y) = 0$, $R(x, y) > 0$ для всех $x, y \in D$. При этом $R(x, y) = b^2(x, y) - a(x, y)c(x, y)$. В зависимости от типа уравнений задаются начальные и граничные условия, связанные с этими уравнениями.

Так, эллиптическое уравнение (уравнение Пуассона)

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = f(x, y), \quad \Gamma: u = \varphi_1(x, y) \quad (3.29)$$

при известных граничных условиях может являться ММ механического вала турбогенератора, оси карданова подвеса ГСП, авена поги ШР, вала привода рулевых исполнительных элементов ЛА. По этой модели определяется функция $u(x, y)$, задающая моменты упругих сил, которые в дальнейшем учитываются в уравнениях (3.7) — (3.18) динамики всего устройства САУ в целом. Параболическое уравнение в простейшем случае для однокоординатной системы

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + f(x, t), \quad \Gamma: u = \varphi_2(x, t) \quad (3.30)$$

применяется при расчетах распространения теплоты в одномерных элементах механических устройств САУ. При этом требуется найти $U(x, t)$ — распространение температуры в зависимости от расположения источника тепла $f(x, t)$ по отношению к измерительной точке оси x в заданные моменты времени t .

Гиперболическое уравнение (волновое уравнение)

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = f(x, y), \quad \Gamma: u = \varphi_3(x, y) \quad (3.31)$$

применяется при расчетах пневматических и гидравлических элементов САУ. В частности, распространение потока, обтекающего элементы корпуса ЛА, расчет давления газа в чувствительном элементе ГСП (см. рис. 3.8, б), расчет давления пара в ТГ проводятся по ММ (3.31), а результаты расчета в виде функции $u(x, y)$ используются в уравнениях (3.7) — (3.18) динамики соответствующих устройств САУ как возмущающие воздействия на систему — составляющие вектора $X(t)$.

Вообще говоря, уравнения (3.28) являются более общими, чем (3.7) — (3.23). Из них можно получить обыкновенные дифференциальные и разностные уравнения как частные случаи. Однако последние используются на более высоком уровне иерархии ММ.

именно в силу своего большего «абстрагирования» от физики процессов в элементах.

При исследовании «собственно» дискретных элементов САУ (релейные, импульсные, элементы микропроцессоров) понятие «состояние» физически связано с «внутренним миром» этих элементов. Различают одноктактные и многотактные дискретные элементы. В *одноктактных* элементах без памяти — совокупность выходных сигналов $Y(nT)$ ($n=0, N$) представляет собой однозначную функцию входных сигналов $X(nT)$ для того же момента времени, т. е. $Y(nT) = \Phi[X(nT)]$. В *многотактных* — элементах с памятью выходные сигналы зависят в данный момент времени $t=nT$ не только от входных сигналов в тот же момент $x(nT)$, но и от состояния внутренних составляющих дискретного элемента $z(n)$ в предыдущие моменты времени:

$$Y(nT) = \Phi\{X(nT), Z((n-1)T), Z((n-2)T), \dots\}.$$

Одноктактные дискретные устройства и элементы САУ описываются булевыми функциями $f(x_1, \dots, x_n)$, где $x_1, \dots, x_n$ принимают значения из множества $\{0, 1\}$. Имеется точно 2^{2^n} булевых функций от n переменных.

С помощью булевых функций однозначно определяется выходной сигнал дискретного устройства при заданных входных.

Многотактные дискретные устройства описываются математическими моделями на основе конечных автоматов. Конечный автомат характеризуется тремя множествами: входным алфавитом X ; множеством входных дискретных сигналов; выходным алфавитом Y — множеством внутренних состояний Z . Функционирование конечного автомата описывается двумя функциями: функцией перехода в новое состояние δ и функцией выходов λ , т. е.

$$Z(nT) = \delta[Z((n-1)T), X(nT)]; \quad Y(nT) = \lambda[Z((n-1)T), X(nT)]. \quad (3.32)$$

Если $Y(nT) = \mu[Z(nT)]$, то вместо (3.32) получим

$$Z(nT) = \delta[Z((n-1)T), X(nT)]; \quad Y(nT) = \mu[Z(nT)]. \quad (3.32^*)$$

Выражения (3.32) определяют работу автомата Мили, а (3.32*) — определяют автомат Мура.

С помощью автоматов Мили и Мура и таблиц переходов между элементами дискретной системы составляются ММ элементов таких устройств САУ, как БЦВМ в ЛА, микропроцессорные системы регулирования в ГСП, регуляторы на микропроцессорах для роботов, турбин и др. С помощью ММ (3.28) — (3.32) определяются коэффициенты и параметры уравнений устройств (3.7) — (3.27), т. е. ММ более высокого уровня.

Перейдем к математическим методам и алгоритмам как компонентам математического обеспечения САПР САУ. Поскольку подробное рассмотрение методов и алгоритмов как компонентов соответствующих инструментов САПР будет дано в последующих главах при изложении конкретных подсистем САПР САУ, здесь мы рассмотрим классификацию, качественный состав методов и алгоритмов, а также остановимся на особенностях построения вычислительных алгоритмов в математическом обеспечении САПР САУ. Одним из возможных подходов к классификации таких методов является их разделение на машинно-ориентированные эвристические и классические методы теории САУ, «чисто» машинные и машинно-аналитические.

Попробуем раскрыть содержание каждого из этих методов. При общих исследованиях САУ задача часто оказывается настолько неопределенной, что приходится пользоваться эвристическими методами (ЭМ). ЭМ — это такие *методы, которые основаны на интуиции и опыте разработчика САУ*.

В настоящее время ЭМ получили развитие благодаря внедрению диалоговых режимов работы «человек — ЭВМ», развитию методов по распознаванию образов, методов факторного эксперимента и т. д. Структурно ЭМ функционируют по схеме, представленной на рис. 3.11, а.

При проектировании сложных САУ приходится иметь дело с тремя категориями условий и исходных данных при решении задач: определению-детерминированными, определенно-вероятностными, неопределенными. В третьем случае имеются лишь некоторые сведения о возможных законах распределения или об интервале возможных значений характеристик и параметров САУ. В этом случае единственно возможным оказывается эвристический подход, который, несмотря на неопределенность исходных данных и условий, позволяет на основе опыта, интуиции и экспертных оценок принимать решения при проектировании САУ. Машинная ориентация такого эвристического подхода сводится к построению алгоритма, который бы сочетал интуицию, опыт и эвристики человека с возможностью быстрой проверки на ЭВМ.

Классические методы созданы для анализа устойчивости качества и точности САУ и ее устройств, решения задач синтеза регуляторов САУ и корректирующих устройств. Классические методы исследования и расчета САУ изложены в многоочередных работах по теории САУ и, как правило, представляют собой скалярные методы, предназначенные для простых систем невысокого порядка. Такой подход вполне оправдан тем, что при отсутствии ЭВМ проектирование САУ осуществлялось путем приближенных теоретических расчетов в сочетании с макетированием и испытаниями, которые составляли, да и сейчас еще составляют наибольшую часть инструментария проектировщика.

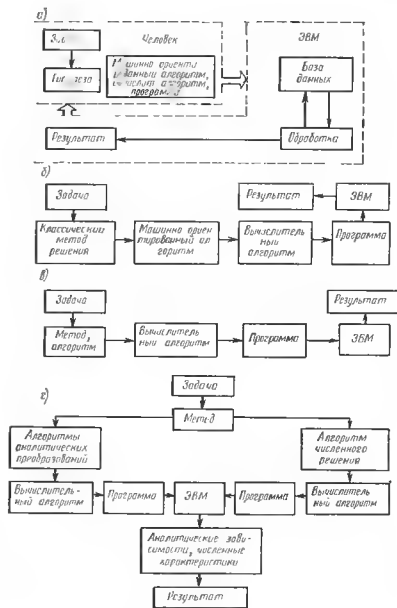


Рис. 3.11. Функциональные схемы методов

Машинная ориентация классических методов состоит в том, чтобы путем создания соответствующих алгоритмов распространить их на системы высокого порядка, многомерные и многокритериальные; оценки проводить не по одному, а по нескольким параметрам; упростить и ускорить процедуру получения конечных результатов; осуществить сервисное представление результа-

тов, графиков, таблиц, расчетных данных с помощью внешних устройств ЭВМ.

Машинная ориентация классических методов теории САУ позволяет значительно ускорить процесс решения задачи, однако при этом не получается качественно новых методов и требуется определенная работа по созданию алгоритмов и вычислительных алгоритмов. Например, широко известный метод ЛЧХ при его реализации на ЦВМ не встречает особых трудностей для минимально-фазовых систем со слабыми резонансными свойствами. В случае неминимально-фазовых систем с резко выраженными резонансными свойствами вычислительные алгоритмы построения ЛЧХ значительно усложняются. Структуру машинно-ориентированные методы можно представить рис. 3.11, б.

С другой стороны, при машинной ориентации традиционных методов следует исходить из вычислительных возможностей ЭВМ. Если при «ручных методах» выбор того или иного подхода в решении задачи — дело вкуса исследователя, то для реализации на ЭВМ вычислительные алгоритмы во многом определяют затраты машинного времени, сходимость вычислительного процесса и т. д.

К классическим методам за последние 30 лет добавились многочисленные методы исследования и проектирования сложных современных САУ. Так, в связи с широким внедрением в САУ микроЭВМ, для синтеза регуляторов применяются методы синтеза цифровых САУ, основанные на псевдочастотных АФЧХ, методах фильтрации, робастных методах. Усложнение САУ привело к появлению статистических методов. Строгие математические методы синтеза на основе принципа максимума Понтригина, динамического программирования Беллмана и их вариации при проектировании САУ получили прикладное развитие за счет приближенных алгоритмов оптимизации.

Итак, машинно-ориентированные методы — это известные в теории САУ методы, реализуемые на ЭВМ в результате составления соответствующего вычислительного алгоритма и программы.

Машинные методы — это методы, которые без ЭВМ не имеют смысла и созданы только для решения задач на ЭВМ (рис. 3.11, в). Это методы математического и полунатурного моделирования, решения задач численного анализа, синтеза, идентификации, методы расчета и машинной обработки больших массивов информации. Только благодаря машинным методам появилась реальная возможность исследовать и проектировать сложные САУ и их устройства (например, БЦВМ, регуляторы на микропроцессорах) в существующие сжатые сроки и с требуемым качеством. Машинные методы — новые методы в теории САУ, их история не превышает 25—30 лет.

Машинно-аналитические методы — это методы, которые включают в себя как аналитические процедуры, так и машинные численные решения и сводятся к процедурам, представленным на

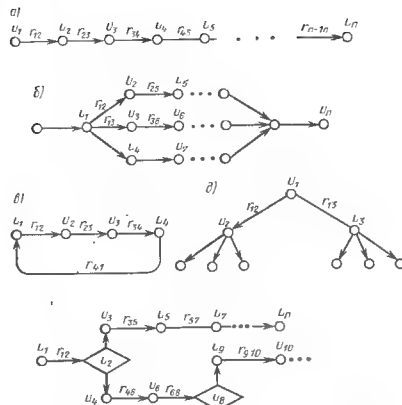
структурной схеме рис. 3.11, а. При таком подходе оказывается возможным получать в аналитическом виде математические зависимости между характеристиками процессов в САУ и ее параметрами, что открывает широкие пути для дальнейших исследований и в то же время сокращает затраты машинного времени на реализацию всех вариантов численного анализа при «чисто» машинных методах.

Алгоритмы, вытекающие из методов, частично будут изложены как компоненты соответствующих подсистем САПР в гл. 4—10, поэтому ограничимся основными правилами их построения. Алгоритмы строятся из отдельных операторов. В соответствии с методом после задания исходных данных (числовых значений, слов, знаков и т. д.) строятся последовательности базовых операторов из заданного их набора. Способы реализации этих операторов считаются известными. Оператор должен быть далее неделимым элементом алгоритма. Составляется структура алгоритма, связывающая базовые операторы. Такую структуру обычно изображают графом, вершинами которого являются операторы, а ребрами — связи между операторами. Различные структуры алгоритмов, представленные соответствующими графами (рис. 3.12), включают последовательные (рис. 3.12, а), параллельные (рис. 3.12, б), циклические (рис. 3.12, в), переключающие (рис. 3.12, г), иерархические (рис. 3.12, д) и комбинированные из рассмотренных структур.

В качестве операторов u_i в приведенных структурах применяются операторы (3.16)—(3.18), (3.27) и др., вытекающие из ММ САУ (3.7)—(3.32).

Построение вычислительных алгоритмов прежде всего связано с особенностями машинной математики. Дело заключается в том, что непрерывная и машинная математика, связанная с дискретным, специальным представлением информации, принципиально отличны. Громадный логический разрыв между дискретным и непрерывным был определен еще Пифагором в 600-х годах до н. э. Тогда же был обнаружен тот факт, что, например, действительное число $\sqrt{2}$ есть иррациональное число. Это число нельзя представить правильной дробью, т. е. отношением целых чисел. Позже другой греческий математик, Эвклид, показал, что каждое действительное число r можно задать сечением, на которое оно разбивает множество всех действительных чисел $R = \{r\}$ — $a < r < b$. Так был определен континуум всех действительных чисел (целые, рациональные, иррациональные).

На ЦВМ существует действительная и целая арифметика. Действительная арифметика является существенно приближенной. Если для целых чисел N на ЦВМ мы имеем только ограничение сверху $N \leq 2^E$, то для действительных чисел, представляемых на ЦВМ в системе счисления с плавающей запятой, они имеют конечное число элементов (а не континуум) и плотность их распо-



ном диапазоне $i, S, \varepsilon_m - 2^{-M}$; на участке от i до $2i$ можно расположить столько же дискретных чисел, сколько на участке от S до $S/2$.

При вычислениях на ЦВМ принципиально присутствует ошибка округления. Поясним ее возникновение простейшими примерами.

Пример 3.1. Решение уравнений с двумя неизвестными точно и приближенно на ЦВМ с представлением чисел шестью знаками после запятой:

$$\begin{array}{l|l} x + \frac{13}{5}y = \frac{1}{5} & 1.000000x + 2.600000y = 0.200000 \\ x + \frac{18}{7}y = \frac{2}{7} & 1.000000x + 2.571429y = 0.285714 \\ \hline \frac{1}{35}y = -\frac{3}{35} & \\ y = -3 & y = -3.000046 \end{array}$$

Как видно из результата, появилась погрешность 0.000046, что значительно хуже установленной точности вычислений.

Операция округления может производиться по-разному в разных ЦВМ, и от принятого способа округления существенно зависит результат.

Пример 3.2. Рассчитаем две разности с точностью трех десятичных знаков после запятой:

- 1) $d_1 = 1000 - 990 = 0,100 \cdot 10^4 = 0,099 \cdot 10^4 = 10$;
- 2) $d_2 = 1000 - 999 = 0,100 \cdot 10^4 = 0,0999 \cdot 10^4 = 1$.

Осуществим операцию округления второго числа во второй строчке, так как в нем на одну цифру после запятой больше допустимого.

Рассмотрим два варианта округления:

- a) $0,0999 \sim 0,100$ и $d_2 = 0$;
- б) $0,0999 \sim 0,099$ и $d_2 = 10$ (как и в случае 1).

Таким образом, разница «числовых осей» ЦВМ $R_{\text{ЦВМ}}$ и вещественных чисел $R_{\text{в.ч}}$ заключается в следующем:

- 1) $R_{\text{ЦВМ}}$ имеет конечное число элементов, а $R_{\text{в.ч}}$ — бесконечное;
- 2) $R_{\text{ЦВМ}}$ имеет разную плотность: числа с плавающей запятой более сжаты со стороны малых величин, имеется столько же чисел между $S = 2^E$ и $S/2 = 2^{E-1}$, сколько их между $2i = 2^{-2^E+1}$ и $i \approx 2^{-2^E}$;

3) нуль изолирован от других величин и должен обрабатываться отдельно;

4) пределы i и S зависят от ЭВМ — программа может пройти на одной ЭВМ и не пройти на другой;

5) результат вычислений существенно зависит от принятого способа округления, в том числе от таких, как «отбрасывание последней цифры», «округление до самого близкого числа»;

6) понятия предела, непрерывности, дифференцируемости теряют на ЦВМ свой смысл и должны быть вновь интерпретированы в машинной математике.

Из-за особенностей машинной математики возникает важная в машинной математике задача — выбор вычислительного алгоритма по критериям минимизации расхода средств и получения требуемой точности.

§ 3.4. Лингвистическое обеспечение

Лингвистическое обеспечение включает в себя совокупность естественных языков проектировщиков с их проблемной ориентацией, алгоритмических языков программирования и машинно-зависимых языков кодирования управления работой (систему команд) технических средств САПР. Выполняя одни из основных принципов создания инструментов САПР — многоязычность, определяющих доступность этих инструментов проектировщикам всех разрядов, специалистам только в своей предметной области, — разработчик САПР строит входной язык инструментов САПР как проблемно-ориентированный язык (ПОЯ). Этот ПОЯ основан на естественном языке проектировщиков. С другой стороны, все процессы в ЭВМ протекают как взаимодействие кодов, построенных из множеств «1» и «0», соответствующих состоянию элементов ЭВМ, которые находятся в одном из двух физических состояний (1 или 0). Дело, таким образом, состоит в том, чтобы по командам, сформулированным на естественном языке проектировщика, эти «0» и «1» «двигались» так, чтобы в результате их движения достигалось решение поставленной проектировщиком задачи.

В табл. 3.8 приведена языковая иерархия, которая позволяет последовательно переходить от естественных языков проектировщиков (0-й уровень) до машинных языков, на которых функционируют устройства ЭВМ (3-й и 4-й уровни). Такой подход возможен только при наличии трансляторов (от лат. *translato* — переносчик) программ, реализованных на ЭВМ и предназначенных для перевода описаний с одного формального языка на другой. Первый из этих языков называется *входным*, второй — *выходным*. Характерными функциями трансляторов являются лексический разбор текста на входном языке, синтаксический анализ предложений и преобразование их в форму, удобную для хранения и дальнейшего использования в вычислительном процессе. В частности, синтаксически управляемый транслятор (СУТ) позволяет на основе формального описания синтаксиса входного языка осуществлять анализ предложений этого языка, а также других входных языков, принадлежащих одному классу по грамматике.

В соответствии с табл. 3.8 требуется по крайней мере четыре транслятора для всей иерархии языков.

Таблица 3.8. Языковая иерархия

Уровни языков	Разряды проектировщиков				Содержание уровней языков
	разработчик	конструктор	технолог	испытатель	
0	ЕЯ _р	ЕЯ _к	ЕЯ _т	ЕЯ _и	Естественный язык проектировщика (язычно-технические отчеты, публикации, проектные документы)
1	ПОЯ _р	ПОЯ _к	ПОЯ _т	ПОЯ _и	Проблемно-ориентированные языки (входные и выходные языки инструментов САПР)
2	ПЛ/Л, СИ ПАСКАЛЬ, БЕЙСИК, КВЕРСИК, СИМ-СКРИПТ	ФОРТРАН, СИ ПЛ/Л, DBCAP, VERB, СЛЭНГ	ПЛ/Л, СИ, ЛИСП, СИМУЛА	ПЛ/Л, СИ, PASCAL, КВЕРСИК, ПАСКАЛЬ	Алгоритмические языки программирования (языки исходных модулей)
3	Автокоды, ЭПСИЛОН	Ассемблеры, АЛМО и др.			Машинно-ориентированные языки (программных и объектных модулей)
4	Интерпретаторы ЕС ЭВМ, СМ ЭВМ, ПЭВМ				Машинные языки (языки объектных и абсолютных модулей)

Естественные языки проектировщиков отличаются от общеразговорных, литературных и гуманитарных языков большей лаконичностью, однозначностью, четкостью построения предложений. Сам процесс проектирования «формирует» такой язык, являющийся некоторым подмножеством языка деловой прозы. Последний служит средством общения людей между собой, людей и машин во всей цепочке от идей до производства готового изделия (см. рис. 1.5).

Особенностями языка проектирования в целом является наличие формализованных диалектов естественных языков разработ-

чика, конструктора, технолога, испытателя (ЕЯ_р, ЕЯ_к, ЕЯ_т, ЕЯ_и) с ограниченным (как правило, не более нескольких сотен) набором базовых понятий — достаточно определенных структур построения предложений, с наличием хорошо формализованных выражений действий проектировщиков и «действий» проектируемых систем и устройств. Например, при выборе чувствительных элементов в контуре регулирования САУ ТГ в текст соответствующего отчета включается предложение: «Для контроля и регулирования температуры поверхности рабочих лопаток турбины необходимо выбрать одно из следующих устройств: манометрические термометры, терморегулирующие устройства, биметаллические термометры, термопары, оптические пирометры». На этом 0-м уровне допускаются эвристические выражения, неполнота и избыточность информации, применение нестандартных символов. Стандартизация и унификация описаний на этом уровне является, по существу, начальным этапом формализации языка проектировщиков. Проблемно-ориентированные языки (ПОЯ) включают в себя описание объекта проектирования, описание задания на проектные процедуры и выходных результатов. В этом смысле ПОЯ являются языками описания конкретных проектных процедур. Остановимся подробнее на ПОЯ, так как остальные уровни языков рассматриваются в базовых вузовских курсах по основам программирования и должны быть знакомы читателю. Требования к ПОЯ включают в себя следующее:

- 1) возможность детального описания объектов, к которым применяется подсистема, инструмент САПР;
- 2) максимальное приближение к естественному языку проектирования данной категории;
- 3) максимальная лаконичность записи;
- 4) однозначность интерпретации элементов записи.

По сравнению с 0 м уровнем в этом случае уточняются эвристические выражения, устраняется неоднозначность описаний, вводятся правила и форма записи, с которой предусматривается наиболее просто и эффективно трансляция на следующий уровень.

Несмотря на отмеченные черты естественных языков проектировщиков от них до ПОЯ довольно длинный путь формализации. На этом пути необходимо выделить дескрипторный словарь, под которым понимается набор ключевых слов — лексических единиц языка с семантическим наполнением. При этом каждая единица должна представлять определенное понятие, действие.

Далее необходимо сформировать формальную «грамматику» ПОЯ — набор правил и директивных конструкций для формирования выражений. Следуя Н. Хомскому (известному специалисту по искусственным языкам) и другим специалистам в области машинной лингвистики, можно определить такую «грамматику» как конечное множество правил, устанавливающих, какие цепочки слов образуют «правильные» предложения. В ПОЯ такие предло-

жения всегда имеют ясную цель — произвести требуемое изменение во внутреннем состоянии ЭВМ или заставить ее «прочитать», «написать», «начертить» содержание части информации, находящейся в устройствах ЭВМ.

Грамматика классифицируется по сложности построения правил для построения допустимых для ЭВМ предложений на следующие виды: 1) грамматики с конечным числом состояний, соответствующие конечным автоматам и отражающие внутреннюю структуру ЭВМ, их систему команд, адресов и т. д.; 2) контекстно-свободные грамматики, соответствующие автоматам с бесконечной «магазинной» памятью и позволяющие строить предложения, не зависящие от смысла и содержания предыдущих и последующих предложений; 3) контекстно-связанные грамматики, которые приближаются к грамматикам естественных языков, но становятся сложными при их машинной ориентации.

Применение контекстно-свободной грамматики будет показано при построении ряда ПОЯ в инструментах «математические модели», «моделирование», «анализ» и др. (см. главы четвертую — восьмую).

Другой важной процедурой при создании ПОЯ является разработка транслятора с этого языка на язык программирования. Обычно это делается объединенными усилиями разработчиков САПР разных специальностей: системных программистов (в том числе специалистов по трансляторам), алгоритмистов (специалистов по алгоритмизации объектов проектирования и проективных процедур). В соответствии с отмеченными обстоятельствами при создании ПОЯ приходится выбирать между сохранением естественных форм языка деловой прозы и сжатием, однозначностью ПОЯ, его удобством для ведения диалога проектировщиками с помощью инструментов САПР.

Синтаксис ПОЯ задается в виде хорошо известных и получивших общее признание правил Бэкуса в их классической форме. Нормальные формы впервые введены американским математиком Бэкусом для описания синтаксиса ALGOL-60 и включают известные правила, обычно залагаемые в курсах по основам программирования. Например, определение идентификатора в форме Бэкуса записывается следующим образом:

<идентификатор>: := <буква> | <идентификатор> <буква> <идентификатор> <цифра> ,

где используются следующие знаки:

<:=> равно по определению,

<|> разделитель, имеющий смысл «или».

Так, приведенная на с. 117 фраза естественного языка и форма Бэкуса будет иметь вид

<выбрать одно из устройств>: :=

<стеклянный термометр> | <манометрический термометр> | <биметаллический термометр> | <термопары> | <оптический пирометр>.

Алгоритмические языки программирования (ФОРТРАН, СИ, ПЛ/1) предназначены для решения широкого класса задач. Обладающими большими удобствами для автоматизации программирования, эти языки, с другой стороны, значительно увеличивают расход средств на трансляцию. Так, трансляция с ФОРТРАНА в 2,5 раза длительнее, чем с Ассемблера. Тем не менее алгоритмические языки — это основные языки, на которых пишутся программы в программном обеспечении (ПО) САПР. В основу всех этих языков положен формульно-словесный способ записи алгоритмов со своим алфавитом, синтаксисом и семантикой. Изложение языков программирования имеется в базовых вузовских курсах и соответствующих учебниках*.

Машинные языки полностью определяются системой команд, адресами ячеек, особенностями конфигурации ЭВМ. Машинные языки — это адресные языки, на них производятся распределение памяти, условная адресация и другие внутренние операции в ЭВМ. Часто возникает необходимость в языках, которые, с одной стороны, учитывают особенности конкретной ЭВМ, а с другой — упрощают процесс составления программ за счет символических обозначений команд. Такие языки получили название автокодов и ассемблеров (от англ. assembler — собирать, монтировать). Ассемблеры позволяют более эффективно использовать аппаратные возможности ЭВМ и широко применяются при создании системных частей программного обеспечения — трансляторов, загрузчиков и т. д. (см. § 3.5). На Ассемблере вместо цифровых обозначений машинных кодов операций и операндов используется буквенное, автоматизируется распределение памяти, используются микроопределения, микрокоманды — заранее подготовленные на том же Ассемблере программные средства, поставляемые в процессе разработки исходной программы.

Например, команда на Ассемблере пересылки 80 байтового поля с именем «СТРОКА 1» на поле «СТРОКА 2» — move character имеет вид MVC: <:СТР 1, СТР 2>. По сравнению с записью той же команды в шестнадцатеричном машинном коде ДКОИ-8, т. е. в двоичном коде обмена информацией (рис. 3.13), запись MVC гораздо экономичнее.

Машинные — внутренние — языки ЦВМ определяются таблицами кодировки, например ДКОИ-8. В таких таблицах элементы кода строятся в соответствии с правилом: номер столбца и строки, на пересечении которых находится интересующий нас символ, определяют соответственно старшую и младшую цифры кода символа. Например, знак + имеет шестнадцатеричный код 4E,

* См., например: Хелис Г. Л. Языки программирования, М., 1985.

B:	4F	A	1b8	A	2F4
КВР	Г	В1	В1	В2	В2

Рис. 3.13. Запись в машинном коде

работке соответствующих компонентов инструментов САПР.

§ 3.5. Программное обеспечение

Программное обеспечение (ПО) представляет собой совокупность машинных программ, правил и соответствующей документации, представленных в заданной форме и позволяющих использовать технические средства САПР для решения различных задач проектирования.

Программное обеспечение делится на базовое (операционная система), общесистемное и прикладное.

Операционная система ОС — это часть программного обеспечения, предназначенная для управления вычислительным процессом ЭВМ и всех терминальных устройств, распределения ресурсов, сервисного обслуживания пользователей, подготовки, обработки и отладки программ. Прикладное программное обеспечение является основным при разработке ПО САПР и состоит из общесистемного ПО и пакетов прикладных программ (ППП), которые реализуют алгоритмы расчета, конструирования, технологической подготовки, испытаний. Чтобы понять роль ПО в САПР, нужно обратиться к принципу действия любой ЭВМ. В основе всякой ЭВМ лежит «умение» оперировать только с одним носителем данных — двоичными числами (битами): «0» и «1». Как же осуществляется управление движением однородной массы из огромного числа битов, с тем чтобы в результате этого движения получилось решение поставленной на ЭВМ задачи? Только путем построения иерархической лестницы из программ на разных уровнях представления информации. Средством написания таких программ являются рассмотренные выше искусственные языки.

Только с помощью иерархической системы программ становится возможным разобраться в широчайшем множестве различных сложных задач, решаемых на ЭВМ. Начнем с верхней ступени иерархии, представленной базовой операционной системы (ОС).

Любая ОС включает следующие составляющие:

— *супервизор* управляет всеми устройствами ЭВМ и контролирует их работу;

— *управление заданиями* автоматизирует переход от одного задания к другому, принимает задания, осуществляет контроль, подготовку запрашиваемых программ к выполнению, запуск их и переход к следующему заданию;

что соответствует двоичному представлению 01001110. Такие таблицы обычно придают-ся к техническому описанию ЭВМ и используются систем-ными программистами при раз-

— *управление задачами* распределяет память ОЗУ; как толь-ко «управление заданиями» распознает шаг задания (например, транслирование, редактирование, сама программа), сразу же по-является «задача» (трансляция, ввод — вывод тела программы);

трансляторы осуществляют перевод с универсальных языков программирования, редактирование, отладку, загрузку;

обслуживающие программы делают пересажис, чистку яче-ек и т. д.;

— *библиотеки ОС* включают в себя исходные модули, объек-тные модули и т. д. Напомним, что исходные модули — это про-граммы, записанные на одном из исходных алгоритмических язы-ков программирования (ФОРТРАН, ПЛ/1 и др.);

— *объектные модули* это программы на языке машинных команд, полученные после трансляции исходных модулей.

Отметим некоторые черты современных ОС на примере SVM — системы «виртуальных машин» (разработчик — фирма «IBM», США). В системе SVM виртуальная память может быть расши-рена до 2 Гбайт, причем каждому пользователю представляется адресное пространство 16 Мбайт, теоретическая система допускает обслуживание 9999 пользователей одновременно. На практике эффективный диалог поддерживается с 300 400 пользователями.

SVM дает каждому пользователю возможность за «своим тер-миналом» иметь «индивидуальную ЭВМ»: виртуальную память, ввод — вывод, процессор.

Стоимость большой ОС определяется трудоемкостью более 500 лет чел (она включает миллионы команд) и значительно пре-вышает стоимость ЭВМ.

Системные программы прикладного программного обеспечения (ППО).

Это средства построения, функционирования и эксплуатации прикладного программного обеспечения: средства выбора нужного модуля из ППП в соответствии с заданием на ПОЯ; средства построения ПОЯ; средства связи модулей в ППП, отладки про-граммы; средства, осуществляющие сервисные, справочные и диаг-ностические функции.

Системные программы ППО необходимы, так как существу-ющие ОС универсальны и потому далеки от оптимальных в смыс-ле требований конкретного пользователя.

Разработка системных программ прикладного программного обеспечения (ППО) САПР САУ проводится в рамках одной сис-темы САПР САУ и удовлетворяет как общим требованиям к ППО, так и частным, специфическим требованиям проектирова-ния САУ. Удовлетворяет этим требованиям наиболее современ-ная форма организации системной (управляющей) части ППО САПР — инструментальная система программирования. Такая форма организации управляющей части ППО позволяет создавать новые или исправлять старые ПОЯ, причем форма создаваемых

языков (так же, как и их содержимое) находится полностью в распоряжении пользователя.

Можно выделить следующие основные черты инструментальных систем программирования:

- наличие средств генерации программ по описаниям, не содержащим явного алгоритма решения задачи;
- ориентацию на решение задач, описываемых на проблемно-ориентированном языке;
- использование банка данных, содержащего большое количество программ и данных;
- наличие средств расширения входных языков;
- эффективное использование базовых ОС для написания и отладки программных модулей.

Более подробно с составом и внутренней организацией инструментальных систем программирования и системой СПИН, разработанной для САПР САУ, можно ознакомиться в специальной литературе*.

Пакеты прикладных программ — комплекс программ, предназначенных для решения проектной задачи, управляемых от программы-монитора или системных программ ППО посредством заданий на ПОЯ.

В структуре пакета можно выделить тело пакета и управляющую программу, которую и называют *монитором*. Тело пакета содержит все программы и сведения о предметной области. Эти сведения определяют семантику входного языка и образуют модель предметной области. Монитор руководит работой всего пакета при решении задач. Он переводит описание задачи с входного языка на внутренний язык, определяет последовательность выполненных программ для каждой задачи, т. е. планирует решение задачи и организует выполнение программ, планируя правильное взаимодействие модулей.

Технология построения ППП в САПР — это деятельность, в которой должны принимать участие специалисты различных областей. Специалисты в предметной области реализуют идеологию проектных процедур, которая является результатом модульного анализа объекта автоматизации.

Когда за разработку пакета принимаются прикладные специалисты, не учитывающие особенности системного программирования, следует опасаться того, что ППП примет форму частично работающего макета задуманной системы. Также малоэффективно, когда ППП разрабатывается без участия достаточно квалифицированных специалистов в предметной области, так как состав решаемых задач может не удовлетворить проектировщика, а

методы решения могут оказаться недостаточно эффективными и ограниченными по применимости.

Прикладное программное обеспечение САПР САУ представляет собой такой же объект проектирования, как и любой другой, поэтому его создание должно быть обеспечено документацией, позволяющей эксплуатировать эти программы. В состав такой документации входят: иерархическая система ППП, описание каждого ППП и каждого модуля внутри ППП, программные документы (листинги, файлы и т. д.), блок-схемы, тесты, инструкции. Построение ППП является сложным и весьма трудоемким процессом.

Построение ППП может быть автоматизировано с помощью системной части ППО, основанной на упомянутой инструментальной системе программирования СПИН.

Инструментальная система программирования СПИН включает в себя систему построения трансляторов (СПТ), которая делится на две составные части: «Конструктор» и «Синтаксический управляемый транслятор» (СУТ). Основной задачей «Конструктора» в ППО является выработка по заданной грамматике ПОЯ совокупности информационных таблиц для настройки СУТ на этот язык. СУТ предназначен для синтаксического анализа входных предложений, составленных на ПОЯ, поступающих из «Конструктора».

Эти требования и принципы положены в основу структуры ППО САПР САУ, изображенной на рис. 3.14. Функционирование ППО происходит следующим образом. Проектировщик вводит описание задачи, фактически являющейся программой действий на ПОЯ. Управляющая программа распознает, к какому ПОЯ из имеющихся в системе должна быть отнесена данная задача, соответствующим образом «настраивает» СУТ и передает ему управление. СУТ анализирует синтаксис программы и формирует последовательность действий на удобном промежуточном языке. Эта последовательность представляет собой список, элементы которого включают в себя номера вызываемых модулей и адреса параметров, которые в этих модулях используются. Если СУТ не обнаружил ошибок в описании задачи, управляющая программа передает управление программе ИНИЦИАТОР, которая в указанной во входных данных последовательности вызывает соответствующие ППП проектировщика (разработчика, конструктора, технолога, испытателя) и обрабатывающие ППП, передает им адреса параметров и следит за правильностью их выполнения. Обрабатывающие ППП включают следующие программы: формирования и обработки аналитических выражений, численного интегрирования систем дифференциальных уравнений, вывода — вывода и т. д. Расширение этих ППП может идти как за счет адаптации ранее полученных программ, так и посредством подключения новых оригинальных программ и пакетов.

* Сольщев Р. И., Ковтун И. В., Пресняк А. С. Инструментальная система построения лингвистического обеспечения САПР/ЭВМ в проектировании и производстве. 1985. Вып. 2.

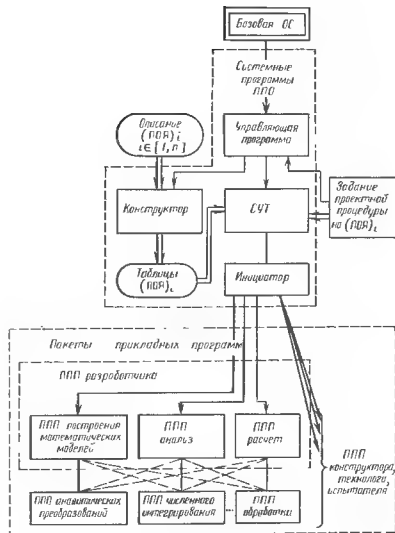


Рис. 3.14. Структура прикладного программного обеспечения САПР САУ

§ 3.6. Информационное обеспечение

Информационное обеспечение — это средство хранения, поиска и выдачи данных, необходимых проектировщику для получения проектных решений с помощью инструментов САПР. Информационное обеспечение возникло из-за необходимости использовать справочную литературу, каталоги, ГОСТы, спецификации и другие материалы по прежним, текущим и перспективным проектам. Существует положение, когда каждый пользователь ЭВМ создает свои собственные библиотеки, «отдельные полки» в библиотеках, размещающиеся на «личных» машинных носителях — магнитных дисках, лентах. Однако в этом случае возникает дублирование. Например, при проектировании датчика углового (ДУ) положения в САУ ЛА (см. рис. 1.1) его данные (масса, габарит, влагостойкость, допустимые ток и потребляемая мощность) требуются как разработчику ДУ, так и разработчику системы управления. При этом данные, которыми пользовался разработчик элементов в «своем ТПП», никак нельзя было использовать в «ППП разработчика САУ». Поэтому возникла необходимость в создании новых средств информационного обеспечения банков данных (БнД) — специально организованной совокупности данных и комплекса языковых, программных средств для хранения, поиска, запросов и выдачи необходимой при проектировании информации всем разрядам проектировщиков в режиме коллективного пользования.

Каждый инструмент (подсистема) САПР включает в качестве компонента отдельные части БнД. При этом пользователем БнД может быть как проектировщик, так и соответствующий инструмент САПР. Например, проектировщик САУ ЛА запрашивает ДУ типа ВТ..., с габаритами ..., точностью ..., мощностью ..., чтобы выбрать схему САУ; ППП «инструмента расчета ДУ» через управляющую программу запрашивает исходные данные для электрического, магнитного, теплового, геометрического расчетов ДУ. БнД состоит из баз данных и СУБД. **База данных** — совокупность всех информационных массивов, описывающих определенный объект, организованная в виде файлов, блоков, статей, групп, элементов. Под **файлом** (англ. file — картотека) понимается совокупность однородных по структуре и способу использования записей, относящихся к определенному объекту (например, характеристики конкретных устройств САУ). **Блоки, статьи, группы, элементы** — дальнейшие ступени в иерархической структуре данных.

СУБД — система программных средств для поиска, запроса, выдачи и управления данными. **Данные** (от англ. data) — число, имя, понятие, правило, представленные в условной форме, удобной для хранения, пересылки, интерпретации и обработки человеком или ЭВМ.

Информация — значение (содержание), вкладываемое человеком в данные. Например, *1 угл. мин* не является данным. *Точность 1 угл. мин* уже данно. *Точность датчика ДУ-873 — 4 угл. мин* — информация. **Элемент** — элементарное данно, которое дальше не делится. **Группа** — объединение элементов по какому-либо признаку. Так, в группу «Система стабилизации ГСП» входят ДУ, У, Дв, ГБ (см. 4, 5, 6, 7, 2, 3 на рис. 1.2).

Статья — совокупность групп, каждая из которых относится к одному объекту. Так, система стабилизации (СС) ГСП включает в себя группы: дискретные СС ГСП, непрерывные СС ГСП.

Блоки — совокупности из статей. Например, блок САУ ГСП

включает в себя статьи: система стабилизации, система приведения, система коррекции, система индикации.

Ниже приведены основные требования к БИД применительно к САПР САУ:

Разнообразие данных, поступающих от разных групп проектировщиков САУ, и возможность их связи в заданные структуры.

Минимальная избыточность. В БИД должно происходить слияние различных ранее самостоятельных файлов в базу данных путем замены части информационных полей в записях ссылками на поля, содержащие аналогичную информацию. При этом сокращается занимаемая данными память и упрощается управление данными.

Целостность. Базы данных в БИД должны содержать только «правильные» данные, которые, следовательно, должны быть защищены от различных необдуманных действий пользователей.

Независимость данных. При использовании БИД представление пользователя о хранящихся в БИД данных не должно меняться при изменении физической и логической организации баз данных, а сами данные не должны зависеть от изменений в прикладных программах и используемых ТП.

Секретность данных. Информация, хранящаяся в БИД, не должна быть утеряна или разрушена в результате вмешательства пользователей, поэтому каждый пользователь должен иметь доступ только к определенной части данных и действия его должны строго контролироваться.

Безопасность данных. В случае возможных случайных сбоев и искажений данных должна быть предусмотрена процедура их восстановления. Хранимая информация должна контролироваться с помощью различных проверочных средств.

Эффективность, производительность и удобство обработки. Система БИД, как и любая вычислительная система, должна удовлетворять требованиям, предъявляемым критериям эффективности и производительности, таким, как оценки быстроты действия, рациональное использование памяти, скорость обработки запросов и т. д.

Мобильность данных. При создании БИД должна быть предусмотрена возможность переноса системы в другую аппаратную и операционную среду.

Попытки использования БИД в САПР предпринимались с 70-х годов. Имеется ряд объективных причин, препятствующих использованию стандартных БИД в САПР. Перечислим эти причины:

— неформализованность части данных процесса проектирования;

— неполнота и противоречивость данных;

— необходимость машинной ориентации данных, алгоритмов и выходных документов;

— неподготовленность проектировщиков;

— необходимость унификации данных как внутри отрасли, предприятия, так и между отраслями, предприятиями и странами;

— противоречивость ГОСТов, ОСТов и специальных нормативов, которые во многом определяют ранжирование и состав БИД.

Специфика САПР вносит ряд дополнительных требований к БИД. Информационные модели в САПР более разнообразны, чем, например, в автоматизированных системах управления производством (АСУП) при меньшем количестве экземпляров каждой модели. Количество связей велико, и связи играют более существенную роль. Модель процесса проектирования должна продвигаться через весь процесс проектирования и быть динамичной, возможно появление новых объектов, новых связей между объектами и, наоборот, устранение существующих. Многие данные должны хранить информацию о том, где их использовать и как они должны обрабатываться, т. е. должна осуществляться интеллектуализация данных.

В САПР необходимо хранить самую разнообразную информацию — словесную, текстовую, графическую. Данные в САПР целесообразно делить по разрядам проектировщиков, создавая базы данных разработчика, конструктора, технолога и испытателя. Должно быть обеспечено взаимодействие между этими базами данных с возможностью передачи данных на следующие этапы проектирования или, наоборот, возврата к более ранним этапам.

Существует определенная часть информации, которая нужна только на отдельных этапах проектирования, после чего подлежит уничтожению либо записи в архив. При плохой организации работ базы данных будут быстро забиваться «мусором» и станут непригодными в использовании. «Мусор» в САПР — это частные, промежуточные результаты, имеющие сиюминутное значение. Он возникает, например, при оптимизации параметров информационной модели объектов проектирования, когда происходит многократное решение проектных задач с разными исходными данными. После выбора окончательного варианта проектного решения данные не нужны.

В перспективе в САПР САУ будут создаваться распределенные базы данных, реализованные на сетях ЭВМ из ТСП и ТП (см. рис. 3.4, 3.7). Повышение «интеллектуализации» инструментов САПР достигается на основе так называемых баз знаний (БЗ). БЗ в отличие от баз данных состоят из таких объектов, как правила решения задач, отношения, закономерности, типовые методики проектирования и другие элементы интеллектуальной деятельности проектировщика. С помощью БЗ строятся инструменты САПР в виде ее экспертных подсистем. Последние применяются, в частности, на этапах согласования технического задания, испытаний и т. д.

С учетом перечисленных выше обстоятельств построение информационного обеспечения САПР САУ проводится путем созда-

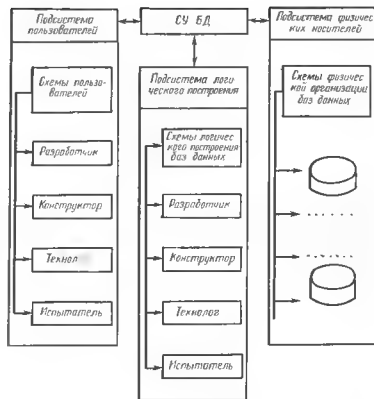


Рис. 3.15. Состав подсистем банка данных

ния банков данных, которые включают в себя несколько баз данных (БД), систему ведения архивов и хорошо налаженное администрирование, специализированные БД, отражающие особенности САУ.

В сложной системе БД можно выделить три подсистемы (рис. 3.15).

Подсистема пользователя. С этой подсистемой связано то, как пользователь представляет себе данные, хранящиеся в БД. Представление пользователя о данных описывается с помощью схемы пользователя. Пользователями БД в САПР САУ являются ППП и проектировщики САУ, работающие с БД при помощи различных терминалов (см. рис. 3.3). Каждая категория проектировщиков имеет свой язык общения с БД, содержащий элементы общего языка манипулирования данными (ЯМД). Фактически элементы ЯМД есть обращения к стандартным подпрограммам, выбора и запоминания данных. Каждый проектировщик-пользователь САПР САУ должен иметь рабочую область памяти для приема и передачи информации в БД.

Логическая подсистема. В логической подсистеме определяется организация построения программ в БД. Описывается общая организация баз данных с помощью логической схемы работы БД. Логическая схема не учитывает физического расположения данных в памяти ЭВМ, чем достигается независимость прикладных программ, ориентированных на представление данных в подсхемах, базирующихся, в свою очередь, на общей логической схеме, от физической организации данных и особенностей аппаратуры.

Физическая подсистема. В физической подсистеме определяется физическая организация баз данных, т. е. типы машинных носителей записей, последовательность хранения этих записей, используемые индексы и т. д. Описывает физическую организацию данных схема, задающая отображения логической схемы системы в память ЭВМ.

Схемы всех трех подсистем записываются на специальном языке описания данных (ЯОД). Компилятор ЯОД переводит их во внутреннее представление и помещает в справочник БД. Справочник БД является важной составной частью БД и кроме описаний схем хранит и другую словесную информацию.

Для управления комплексом программ банка данных служит система управления базами данных (СУБД). Основной функцией СУБД является выполнение операций выборки и запоминания данных по запросам пользователей. При этом СУБД использует схемы трех подсистем.

Действие СУБД по запросу пользователя происходит следующим образом. В запросе передается значение ключа тех данных, которые необходимо выбрать из базы данных пользователя. Используя соответствующую схему БД (рис. 3.15), СУБД находит описание данных, на которые выдан запрос. При помощи логической подсистемы и полученного описания данных в подсистеме пользователя СУБД определяет, каких типов логические данные необходимы. После этого происходит обращение к физической подсистеме и определяются физические записи, которые необходимо «считать», чтобы удовлетворить запрос. Операционная система по команде «Чтение», получаемой от СУБД, выдает требуемую запись, которую затем пересылает в буферную память БД. Снова обращаясь к логической подсистеме БД и подсистеме пользователя, СУБД выделяет запрошенную запись и передает ее пользователю. Аналогичным образом происходит и запоминание данных.

В САПР целесообразны СУБД, подобные СУБД АДАБАС, разработанной в ФРГ в начале 70-х годов. Соответствуя своему названию (адаптивные базы данных), такие СУБД позволяют настраиваться на проблемную область, причем не только при создании, но и при сопровождении базы данных — в системе легко создаются новые файлы, устанавливаются и разрываются связи

между файлами, назначаются и отменяются дескрипторы. Благодаря хорошо отлаженному и удобному программному обеспечению системы типа АДАБАС завоевали широкую популярность. При разумных дополнительных затратах на их дополнение в конкретных САПР они обеспечивают большую скорость и удобство поиска данных. В Советском Союзе имеется несколько аналогов СУБД АДАБАС — АИСТ, СПЕКТР, ДИСОД.

Наряду с СУБД проектного предприятия существуют СУБД, применяемые на более низких уровнях иерархии информационного обеспечения САПР, а именно для ТСП и ТП (см. рис. 3.4). К таким СУБД относятся dBASEII, dBASEIII, применяемые для ПЭВМ. Более подробные характеристики СУБД приведены в отдельных изданиях*.

§ 3.7. Методическое и организационное обеспечение

Под *методическим обеспечением* в САПР понимается совокупность документов, правил, инструкций, нормалей, стандартов, необходимых для правильной эксплуатации инструментов САПР и их выбора. В значительной степени эта совокупность нашла отражение в ГОСТах. Роль методического обеспечения при разработке САПР определяется особенностями перехода от сложившейся на практике системы решения проектных задач преимущественно неавтоматизированными средствами к автоматизированной системе решения этих задач при помощи инструментов САПР. Методическое обеспечение САПР охватывает проведение работ в целом и выделение последовательности выполнения проектных процедур, операций, расчетных и конструкторских задач, методику их описания, а также методику кодирования задач проектирования.

Под *организационным обеспечением* понимается совокупность документов, устанавливающих положение и состав подразделений САПР в НИИ и КБ, связей этих подразделений со всеми подразделениями предприятия, форму представления результатов проектирования и порядок рассмотрения документов в процессе применения САПР.

В состав организационного обеспечения САПР САУ входят следующая совокупность компонентов: положение о САПР, дополнительные инструкции работников службы САПР, штатное расписание подразделения САПР и др., регламентирующие организационную структуру, функции подразделений и порядок их взаимодействия в условиях функционирования САПР САУ.

Организационное обеспечение САПР САУ определяется составом и функциями взаимодействующих при автоматизированном

проектировании подразделений в проектной организации. Наряду с подразделениями, которым присущи традиционные формы, при проектировании объектов в условиях функционирования САПР должны содержаться группы специалистов с новыми функциями. В зависимости от выполняемых функций специалисты делятся на группы: проектирующая, обеспечивающая и организующая.

В проектирующую группу входят проектировщики, непосредственно осуществляющие проектные процедуры и операции инструментами САПР.

Обеспечивающая группа должна состоять из специалистов, осуществляющих функции по поддержанию работоспособности САПР в процессе эксплуатации. Основными функциями этой группы и ее сотрудников являются:

информационное обслуживание, накопление, хранение, изменение на машинных носителях информации, необходимой для осуществления или повышения эффективности процесса проектирования САУ;

обслуживание и поддержание работоспособности компонентов технического, программного и информационного обеспечения и САПР в целом;

хранение и размножение проектно-конструкторской документации на машинных носителях.

Организирующая группа состоит из специалистов, осуществляющих функции по организации и управлению созданием и развитием САПР.

При создании организационного обеспечения САПР проводится следующая работа:

— пересматриваются положение о проектных подразделениях, их штатные расписания, должностные инструкции проектировщиков;

— разрабатывается порядок рассмотрения и передачи проектной документации с учетом машинных носителей информации;

— разрабатывается положение о новых обеспечивающих и организующих подразделениях, их штатные расписания и должностные инструкции специалистов;

— разрабатывается порядок взаимодействия подразделений САПР с проектными подразделениями и другими службами автоматизации, например взаимодействие с АСУТП, ГПС (см. рис. 1.5).

Обеспечивающие и организующие группы специалистов, которые характерны для автоматизированной формы организации проектирования САУ, требуют создания службы САПР САУ во главе с главным конструктором САПР, с новыми, не свойственными традиционным формам подразделений. Все специалисты указанных групп должны пройти специальную подготовку в вузах. Подробнее с методическим и организационным обеспечением САПР можно ознакомиться в [8, 9].

* См., например: Костин А. Е., Шаньгин В. Ф. Организация и обработка структур данных в вычислительных системах. — М.: Высшая школа, 1987, с. 248.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ САУ

§ 4.1. Методы построения математических моделей и их применение в САПР

Под математической моделью (ММ) обычно понимается отображение реального объекта с помощью системы математических соотношений.

При построении ММ САУ будем исходить из уровней описания САУ, представленных на рис. 3.8, а, система — устройство — элемент. Наибольшие трудности возникают при построении ММ объектов управления, так как учет физических процессов и явлений в этих объектах требует длительных и весьма трудоемких математических операций. Большое количество однообразных и утомительных операций при построении ММ, в том числе дифференцирование, умножение полиномов на полином, раскрытие скобок, приведение подобных членов, неизбежно связаны с многочисленными ошибками и «неудачностью» ММ. Автоматизация этих операций является обязательной в САПР САУ.

Будем различать графические, аналитические и численные методы построения ММ САУ.

Графические методы применяются при построении ММ САУ на верхнем уровне их описания в форме структурных схем и их графовых эквивалентов. В этом случае проектировщик исходит из представления о САУ как о сложной системе, состоящей из устройств и элементов (см. структурные схемы САУ ЛА, ТГ, ГСН, ЦПР и их графы на рис. 3.10). «Внутреннее содержание» устройств обычно отражается типовыми линейными звеньями САУ или условными обозначениями.

Важным условием автоматизации графических способов является разработка алгоритмов ввода структурных и графовых моделей в ЭВМ. Такие алгоритмы будут рассмотрены в § 4.4. Графические методы построения геометрических моделей устройств и элементов САУ широко применяются в конструкторском и технологическом проектировании (см. гл. 8, 9).

При аналитическом построении ММ исходными являются общие законы физики, результаты обобщения тысячелетнего опыта, накопленного ранее усилиями ученых и инженеров. Это прежде всего законы сохранения энергии, массы и вытекающие из них принципы наименьшего действия, непрерывности материальных потоков, кинетико-химических реакций, теплового баланса и т. п. Естественно, что приложение этих законов и принципов применительно к тому или иному физическому устройству САУ приводит к различным выражениям. Так, уравнения движения объекта

управления САУ ЛА как твердого тела с шестью степенями свободы выводятся на основе второго закона Ньютона: для поступательного движения ЛА

$$m(t) \frac{dV(t)}{dt} = F(t), \quad (4.1)$$

для вращательного движения ЛА относительно центра масс

$$J(t) \frac{d\omega(t)}{dt} = M(t), \quad (4.2)$$

где $m(t)$ — масса ЛА; $V(t)$ — вектор линейной скорости центра масс ЛА; $F(t)$ — вектор внешних сил, действующих на ЛА; $J(t)$, $\omega(t)$, $M(t)$ — тензор инерции, вектора угловой скорости и момента внешних сил соответственно.

Уравнения движения объектов управления, устройств САУ также выводятся на основе соответствующих законов и принципов. В частности, уравнения движения механических и электро-механических устройств строятся с помощью формализма Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i, \quad t \in \overline{1, n}, \quad (4.3)$$

где $T(q_i, \dot{q}_i, t)$ — кинетическая энергия системы, скалярная функция, зависящая от координат, скоростей, моментов инерции и масс системы; $q_i(t)$, $\dot{q}_i(t)$ — обобщенные координаты и скорости; t — время; $Q_i(t)$ — обобщенные силы.

Уравнения движения радиоэлектронных устройств и элементов САУ выводятся на основе законов Кирхгофа I и II рода:

$$\sum_{s=1}^n I_{sK} = 0; \quad \sum_{s=1}^n U_{sK} = E_K, \quad k = \overline{1, 2, \dots, m}, \quad (4.4)$$

где I_{sK} , U_{sK} , E_K — токи, падения напряжения и ЭДС в соответствующих контурах электрической схемы.

Уравнения движения гидравлических, пневматических и других устройств САУ выводятся на основе аналогичных законов.

Удобен для вывода дифференциальных уравнений движения динамической системы формализм Лагранжа (4.3). Замечательное свойство формализма Лагранжа — его независимость от выбора обобщенных координат q_i , поэтому появляется возможность выбора удобной для исследований системы координат. Обобщенные силы Q_i являются производными от функций энергии различного происхождения: потенциальной $U(q_i)$, «энергии рассеяния» D , энергии регуляторов $E(q_i, \dot{q}_i)$, т. е.

$$Q_i^U = - \frac{\partial U}{\partial q_i}; \quad (4.5)$$

$$Q_i^D = - \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i}; \quad Q_i^E = - \frac{\partial E}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial E}{\partial q_i}. \quad (4.6)$$

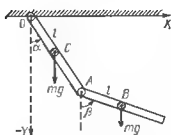


Рис. 4.1. Кинематика звеньев «ноги» ШР

Пример 4.1. Построение ММ движения звеньев «ноги» шагающего робота (ШР) на основе формализма Лагранжа.

Кинематическая схема в этом примере состоит из двух звеньев и двух шарниров (рис. 4.1). Будем считать для простоты выкладок длины этих звеньев одинаковыми — l , а массы — сосредоточенными в серединах звеньев и также одинаковыми. Тогда кинетическая энергия первого звена будет

$$T_1 = \frac{1}{2} J_1 \omega_1^2, \quad (4.7)$$

где J_1 и ω_1 — момент инерции и угловая скорость вращения первого звена относительно начала координат, или

$$T_1 = \frac{1}{2} \frac{ml^2}{3} \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{6} ml^2 \dot{\alpha}^2. \quad (4.8)$$

Аналогично, кинетическую энергию второго звена можно представить выражением

$$T_2 = \frac{1}{2} ml^2 \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{6} ml^2 \dot{\beta}^2 + \frac{1}{2} ml^2 \cos(\alpha - \beta) \dot{\alpha} \dot{\beta}. \quad (4.9)$$

а полная кинетическая энергия является суммой энергий звеньев:

$$\begin{aligned} T = T_1 + T_2 &= \frac{2}{3} ml^2 \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{6} ml^2 \dot{\beta}^2 + \frac{1}{2} ml^2 \cos(\alpha - \beta) \dot{\alpha} \dot{\beta} = \\ &= \frac{1}{6} ml^2 (4\dot{\alpha}^2 + \dot{\beta}^2 + 3 \cos(\alpha - \beta) \dot{\alpha} \dot{\beta}). \end{aligned} \quad (4.10)$$

Обобщенные силы Q_i для рассматриваемой системы будут

$$Q_1 = -\frac{3}{2} mgl \dot{\alpha} \sin \alpha, \quad Q_2 = -\frac{1}{2} mgl \dot{\beta} \sin \beta. \quad (4.11)$$

Следуя формализму Лагранжа, запишем теперь выражения для соответствующих частных производных:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \alpha} &= \frac{1}{6} ml^2 (8\dot{\alpha} + 3 \cos(\alpha - \beta) \dot{\beta}); \\ \frac{\partial T}{\partial \alpha} &= -\frac{1}{2} ml^2 \dot{\alpha} \dot{\beta} \sin(\alpha - \beta), \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{\beta}} &= \frac{1}{6} ml^2 (2\dot{\beta} + 3 \cos(\alpha - \beta) \dot{\alpha}), \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{\beta}} &= \frac{1}{2} ml^2 \dot{\alpha} \dot{\beta} \sin(\alpha - \beta); \end{aligned} \quad (4.12)$$

и обыкновенных производных:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} = \frac{1}{6} ml^2 (8\ddot{\alpha} + 3 \cos(\alpha - \beta) \ddot{\beta} - 3\dot{\beta} \sin(\alpha - \beta) (\dot{\alpha} - \dot{\beta})); \quad (4.13)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\beta}} = \frac{1}{3} ml^2 \ddot{\beta} + \frac{1}{2} ml^2 \ddot{\alpha} \cos(\alpha - \beta) - \frac{1}{2} ml^2 \dot{\alpha} \sin(\alpha - \beta) (\dot{\alpha} - \dot{\beta}).$$

В результате получим выражение для ММ динамики рассматриваемой системы:

$$\begin{aligned} \frac{4}{3} \ddot{\alpha} + \frac{1}{2} \cos(\alpha - \beta) \ddot{\beta} - \frac{1}{2} (\dot{\alpha} - \dot{\beta}) \sin(\alpha - \beta) + \\ + \frac{1}{2} \dot{\alpha} \dot{\beta} \sin(\alpha - \beta) = -\frac{3}{2} \frac{g}{l} \dot{\alpha} \sin \alpha, \\ \frac{1}{3} \ddot{\beta} - \frac{1}{2} \dot{\alpha} \dot{\beta} \sin(\alpha - \beta) + \frac{1}{2} \ddot{\alpha} \cos(\alpha - \beta) - \frac{1}{2} \dot{\alpha}^2 \sin(\alpha - \beta) + \\ + \frac{1}{2} \dot{\alpha} \dot{\beta} \sin(\alpha - \beta) = -\frac{1}{2} \cdot \frac{g}{l} \dot{\beta} \sin \beta. \end{aligned} \quad (4.14)$$

Численные методы формирования ММ, включают в себя последовательность операций по обработке и анализу априорной и апостериорной числовой информации об объекте. В результате выполнения анализа получаются структура и параметры ММ объекта.

Последовательность операций при этом обычно такая.

Задаются математические зависимости между входными и выходными переменными в статике. Проводится факторный анализ априорных и апостериорных данных с целью отсеивания несущественных переменных в этих зависимостях. Под факторным анализом понимается приближенная оценка параметров и коэффициентов уравнений в зависимости от выбранной меры точности совпадения экспериментальных и теоретических данных.

Проводятся эксперименты по определению реакции системы на воздействия по времени. Строятся оценки динамических характеристик объекта во времени. Строятся математические зависимости между выходными и входными переменными в динамике.

Перечисленные операции методики построения ММ входят как составляющие в большой раздел теории САУ, известный как идентификация систем и устройств.

Под идентификацией в теории САУ обычно понимают построение ММ объектов по априорной и апостериорной информации и, в частности, по известным их входным и выходным сигналам. Наиболее распространенными методами параметрической идентификации, когда структура ММ уже задана, а требуется найти только ее параметры в соответствии с заданными критериями адекватности ММ и объекта.

Определение ММ динамики системы сводится к идентификации оператора L в выражении

Определение ММ динамики системы сводится к идентификации оператора L в выражении

$$Y(t) = L[X(t), \Lambda(t), C(t)], \quad (4.15)$$

где $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$, $X = (x_1, x_2, \dots, x_l)$ — векторы выходных и входных сигналов САУ; $\Lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$ — вектор параметров системы; $C = (c_1, c_2, \dots, c_r)$ — вектор сигналов помех, возникающих внутри системы; L — искомый оператор, в общем случае нелинейный.

Применяемые на практике методы идентификации разработаны в основном для линейных детерминированных и стационарных стохастических систем. В последнем общем случае большое число этих методов базируется на известном уравнении Н. Винера (американский математик и кибернетик, 1894—1964), выведенном для определения характеристик фильтров:

$$K_{xy}(\tau) = \int_0^{\infty} K_{xx}(t - \tau) h(\tau) d\tau, \quad (4.16)$$

где $h(\tau)$ — неизвестная входов вектор-функция системы; $K_{xx}(\tau)$ — известная корреляционная матрица; $K_{xy}(\tau)$ — взаимно корреляционная вектор-функция стационарных случайных процессов на входе и выходе этой системы.

Наиболее плодотворными и перспективными являются методы идентификации оператора L , построенные на принципе настраиваемой модели. Основная идея этого подхода сводится к схеме, представленной на рис. 4.2. Эта общая схема включает в себя довольно широкий набор вариантов, которые различаются в основном организацией процесса настройки модели в смысле принятого критерия идентификации. Выбор такого критерия – сложная задача, во многом определяющая алгоритмы и техническую реализацию подобных схем.

Наиболее распространены выражения критериев в виде функционалов:

$$U_1 = \int_0^T \varepsilon^2(t) dt; \quad (4.17)$$

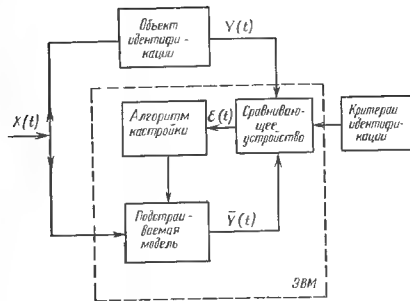


Рис. 4.2. Структурная схема идентификации на основе настраиваемой модели

интеграл от ошибки с весовой функцией времени

$$U_2 = \int_0^t f(t) \cdot \varepsilon(t) dt, \quad (4.18)$$

выделяющий ошибку тем больше, чем позже она появилась по отношению к входному сигналу;

интегральный критерий вида

$$U_3 = \frac{\int_0^t e^2(t) dt}{\int_0^t X^2(t) dt}, \quad (4.19)$$

который позволяет осуществлять нормированную по входному сигналу $x(t)$ оценку ошибки $e(t)$.

В последнее время в качестве критериев идентификации используются получившие распространение в теории оптимальных систем функции потерь или штрафа, под которыми в идентификации понимается штраф, связанный с недостатком абсолютной точной идентификации. В общем виде этот критерий представляется в виде условного математического ожидания штрафа за ошибку:

$$U_4 = \int_{-\infty}^{\infty} G[\varepsilon(t)] p\left(\frac{\varepsilon}{Y}\right) d\varepsilon, \quad (4.20)$$

* Гроп Д. Методы идентификации систем. М., 1979.

где $G[\varepsilon(t)]$ означает штраф за ошибку $\varepsilon(t) = Y - \bar{Y}(t)$; Y — истинное значение вектора выходных координат; $\bar{Y}(t)$ — оценка Y , основанная на некотором его наблюдении; $p\left(\frac{\varepsilon}{Y}\right)$ — условная плотность вероятности величин ε и Y .

В схемах с настраиваемой моделью, как правило, структура модели предполагается известной, а настройке подвергаются параметры модели. Наиболее распространенными алгоритмами настройки являются градиентные и итерационные. Применение существующих методов идентификации к САУ приводит к необходимости решения сложных алгоритмических и вычислительных задач в связи с гетерогенностью, большой неопределенностью, многосвязностью САУ.

Наиболее целесообразным способом построения ММ САУ, который можно положить в основу построения соответствующей подсистемы САПР САУ, является сочетание аналитических методов с численными. При этом аналитическими методами строятся возможно более полные ММ, а с помощью численных методов идентификации осуществляется количественная оценка параметров модели и обеспечивается адекватность ее реальному объекту. Такой подход, реализуемый средствами САПР, оказывается эффективным не только для экономии высококвалифицированного труда, но и для значительного повышения адекватности ММ САУ реальному объекту. При этом процедура построения ММ состоит из трех этапов:

- вывод полной ММ в аналитической форме на основе классических принципов и формализмов динамики;
- упрощение и преобразование ММ в соответствии с назначением и особенностью модели;
- параметрическая идентификация упрощенных ММ по результатам экспериментальных исследований и испытаний.

В последующих параграфах рассматриваются вопросы автоматизации первого и второго этапов построения ММ САУ. Автоматизация третьего этапа будет показана в гл. 10 с помощью средств подсистемы «Испытания» САПР САУ.

§ 4.2. Вывод математических моделей в аналитическом виде на ЭВМ

Расчет и исследование САУ на всех уровнях базируется на ММ двух видов: уравнения динамики и уравнения статики. Последние получаются из уравнений динамики как частный случай после установления переходных процессов. Так, система уравнений в форме (3.7)

$$F(\ddot{Y}, \dot{Y}, Y, U, X, A, t) = 0 \quad (4.21)$$

является уравнением динамики. Если в этой системе положить $X = X_0 = \text{const}$, $U = U_0 = \text{const}$, $\ddot{Y} = \dot{Y} = 0$, что соответствует установившемуся режиму при $t = T$, то получим уравнение статики

$$F(0, 0, Y_c, U_0, X_0, A, T) = 0. \quad (4.22)$$

Уравнение (4.22) получается в результате простейшей операции упрощения ММ. В более сложных случаях упрощение полных ММ требует специальных методов и алгоритмов и оказывается обязательной процедурой в общей подсистеме САПР «Построение ММ».

Все выкладки, необходимые для вывода уравнений САУ, обычно сводятся с математической точки зрения к последовательному выполнению таких операций, как умножение матрицы на вектор, перемножение матриц, сложение, вычитание, перемножение алгебраических полиномов, дифференцирование сложных функций и приведение подобных членов.

Для автоматизации перечисленных операций с позиции пользователя необходимы три условия: язык, допускающий проведение аналитических преобразований данного типа на ЭВМ; соответствующая ЭВМ; устройство диалога человека с ЭВМ в процессе составления уравнений.

Если технические средства САПР САУ (см. § 3.3) содержат ЭВМ и ТП, необходимые для выполнения второго и третьего условий, то разработка ПОЯ и ряда программных средств, предусмотренных в прикладном программном обеспечении САПР САУ (см. § 3.4), становится обязательной для выполнения первого условия успешного построения ММ на ЦВМ.

Если при выводе дифференциальных уравнений «вручную» выбор того или иного метода зависит скорее от вкусов исследователя, чем от каких-либо вычислительных преимуществ, то при машинном выводе уравнений выбор метода имеет определяющее значение. Дело в том, что количество и вид операций, приемлемость существующих языков и программ, длительность вычислительного процесса, загрузка оборудования и расход средств на решение во многом определяются принятым методом составления уравнений. В общем случае выбор метода и системы программных средств аналитических преобразований должен подчиняться зависимости

$$\min\{F - G \setminus H\}, \quad (4.23)$$

определяющей разность двух множеств: G — операций исходного алгоритма, представленных на выбранном языке аналитических преобразований, H — операторов аналитических преобразований, допускаемых выбранной системой программирования.

Анализ алгоритмов вывода по критерию (4.23), а также с точки зрения наименьших затрат машинного времени и подготовительных операций оказывается достаточно сложным. Проведение

такого анализа применительно к тестовым задачам вывода уравнений ЛА, ГСП и других САУ показали, что по соображениям простоты подготовки исходных данных, длины программы, времени счета, объема работы оператора преимущества имеет формализм Лагранжа (4.3).

В соответствии с рассматриваемым классом объектов алгоритм формирования их ММ должен обеспечивать построение моделей как механической, так и электрической, гидравлической и других частей САУ. Формализм Лагранжа представляет единый алгоритм машинного вывода уравнений, одинаково пригодный для всех частей. Действительно, число этих уравнений соответствует числу обобщенных координат независимо от того, являются эти координаты механическими, электрическими или какими-либо другими.

Перечисленные обстоятельства являются основанием для выбора формализма Лагранжа за основу при разработке алгоритмов вывода уравнений САУ. В дальнейшем будем рассматривать только механические и электрические устройства САУ. В качестве обобщенных координат будем принимать угловые и линейные перемещения механических элементов и количества электричества, протекающего через сечения проводников электрических элементов. Обозначим через

$$\mathbf{Y}^n = (y_1, y_2, \dots, y_n) \quad (4.24)$$

вектор обобщенных координат механической части и через

$$\mathbf{Y}^{N-n} = (y_{n+1}, y_{n+2}, \dots, y_N) \quad (4.25)$$

вектор обобщенных координат электрической части системы. Тогда кинетическая энергия всей системы может быть представлена выражением

$$\mathbf{T} = \frac{1}{2} \sum_{(i,j)=1}^n m_{ij} \dot{y}_i \dot{y}_j + \frac{1}{2} \sum_{(k,j)=n+1}^N L_{kj} \dot{y}_k \dot{y}_j, \quad (4.26)$$

а потенциальная энергия всей системы — выражением

$$\mathbf{U} = \frac{1}{2} \sum_{(i,j)=1}^n d_{ij} y_i y_j + \frac{1}{2} \sum_{(k,j)=n+1}^N c_{kj} y_k y_j. \quad (4.27)$$

Введем также обобщенные силы демпфирования

$$\mathbf{R} = (R_1, R_2, \dots, R_N)^T, \quad (4.28)$$

где

$$R_s = \sum_{i=1}^n h_{si} \dot{y}_i + \sum_{j=n+1}^N r_{sj} \dot{y}_j, \quad s = \overline{1, N},$$

и обобщенные силы внешних воздействий

$$\mathbf{Q}(t) = \mathbf{Q}_m + \mathbf{Q}_e, \quad \mathbf{Q} = (Q_1, Q_2, \dots, Q_N).$$

В выражениях (4.26) — (4.28) обозначено: m_{ij} , d_{ij} — механические массы (моменты инерции), статические коэффициенты упругих сил; L_{kj} , C_{kj} — электромагнитные и электростатические коэффициенты индукции; h_{si} , r_{sj} — механические и электрические сопротивления; Q_m , Q_e — механические внешние моменты и электрические напряжения от внешних источников — известные функции времени.

Составляя теперь уравнения Лагранжа с учетом (4.27), (4.28), найдем

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \dot{y}_i} \right) - \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial y_i} - \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial y_i} - \mathbf{R}_i + \mathbf{Q}_i, \quad i = \overline{1, N}. \quad (4.29)$$

Уравнения (4.29) можно преобразовать исходя из экономичности вычислительного процесса на ЭВМ (уменьшение числа операций, затрат машинного времени и т. д.).

Так, если в дальнейших исследованиях потребуются численное интегрирование полученной ММ, то ее обычно приводят к канонической форме. Получение уравнений в канонической форме можно осуществить сразу, если воспользоваться обозначением $P_i = \partial \mathbf{T} / \partial \dot{y}_i$, $i = \overline{1, N}$. Тогда уравнения (4.29) преобразуются к виду

$$\dot{P}_i = \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \dot{y}_i} - \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial y_i} - \mathbf{R}_i + \mathbf{Q}_i, \quad i = \overline{1, N}.$$

Так как уравнения $P_i = \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \dot{y}_i}$ линейны относительно $\dot{y}_i$, то они могут быть разрешены относительно $\dot{y}_i$:

$$\dot{y}_i = \Phi(P_1, P_2, \dots, P_N), \quad i = \overline{1, N}.$$

В результате уравнения (4.29) приводим к виду

$$\dot{P}_i = \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \dot{y}_i} - \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial y_i} - \mathbf{R}_i + \mathbf{Q}_i, \quad i = \overline{1, N}; \quad (4.30)$$

$$\dot{y}_i = \Phi(P_1, P_2, \dots, P_N), \quad i = \overline{1, N},$$

или, вводя новую переменную

$$z_j = \begin{cases} P_i, & \text{если } i = j = \overline{1, N}, \\ y_i, & \text{если } i = j = \overline{N+1, 2N}, \end{cases}$$

получим

$$\dot{z}_j - \frac{\partial T}{\partial z_{j+N}} - \frac{\partial U}{\partial z_{j+N}} - R_j + Q_j, \quad j = \overline{1, N};$$

$$\dot{z}_j - \Phi(z_1, z_2, \dots, z_N), \quad j = \overline{N+1, 2N}.$$

Это выражение можно записать с точностью до обозначений в форме (3.10):

$$\dot{z} = F(z, Q, A, t). \quad (4.31)$$

Процедура построения ММ «механической части» САУ на основе формализма Лагранжа состоит из следующих операций:

- 1) выбор систем координат, связанных с отдельными элементами механической части устройства;
- 2) выбор обобщенных координат;
- 3) определение проекций угловых и линейных скоростей элементов механической части устройства на соответствующие оси координат;
- 4) составление выражений для кинетической и потенциальной энергий и обобщенных сил демпфирования (4.26) — (4.28);
- 5) определение обобщенных сил Q_i ;
- 6) определение производных в соответствии с уравнением (4.29);
- 7) составление уравнений (4.29).

Каждую из этих операций можно представить в виде совокупности некоторых операторов.

Подготовка соответствующих выражений для формализма Лагранжа «электрической части» устройств САУ сводится к определению контуров электрической схемы (графа схемы), параметры и обобщенные координаты которых используются в дальнейших исследованиях. Структурной электрической схемы или графом однозначно определяется количество независимых электрических токов (обобщенных скоростей). Общее количество токов в схеме определяется количеством ветвей графа. Количество независимых токов равно количеству независимых контуров. Каждому независимому току можно поставить в соответствие свой независимый контур, который в этом отношении соответствует оси координат в механической системе и соответствующей обобщенной скорости.

Соприкоснувшиеся независимые контуры образует электрическую схему. При подготовке к составлению ММ электрической части нужно придерживаться такой последовательности действий:

- 1) определить количество узлов схемы;
- 2) определить количество ветвей;
- 3) определить количество независимых обобщенных координат или независимых контуров;
- 4) выбрать независимые токи, необходимые для исследования;
- 5) определить конфигурацию контуров так, чтобы контурный ток был равен независимому току.

Обобщенные силы задаются в виде источников напряжения (если в схеме имеются источники тока, то их надо свести к источникам напряжения).

В дальнейшем на ПОЯ, к описанию которого мы и переходим, проектировщик задает исходные данные и ставит задачу. Эта информация в соответствии со структурой ППО САПР САУ (см. рис. 3.14) поступает на управляющую программу СУТ, которая в зависимости от оператора ПОЯ вызывает соответствующие модули ППП «Аналитические преобразования» (выполняющие математические действия сложения, вычитания и перемножения матриц, дифференцирования и т. д.) и выдачу на печать промежуточных и конечных результатов.

Перейдем к описанию проблемно-ориентированного языка (ПОЯ) построения ММ в аналитической форме*. Изложим здесь только ту его часть, которая необходима для вывода уравнений механических устройств САУ, поскольку для электрической, гидравлической и других частей САУ такой ПОЯ строится аналогично.

Программа на ПОЯ «Вывод ММ» представляет собой последовательность операторов, разделенных точкой с запятой (;). Вводимые в программу комментарии выделяются апострофами. Служебные слова этого языка можно сокращать до такой степени, пока это слово однозначно можно отличить от другого. Сокращенное слово должно обязательно заканчиваться точкой. Идентификатором в ПОЯ может быть любая последовательность букв латинского алфавита или цифр, начинающаяся с буквы и не содержащая более шести символов.

Основным понятием языка является понятие системы координат (СК). Программа на ПОЯ «Вывод ММ» есть описание последовательности СК, а потому любой фрагмент программы связан с какой-нибудь системой координат, которая, вообще говоря, является текущей. Первую же СК будем называть исходной. Описываемая на этом языке последовательность систем координат должна начинаться от исходной СК, связанной с неподвижной системой отсчета, проходить через все тела, составляющие механическую часть САУ, причем последовательность эта может быть разветвленной, т. е. от одной системы координат можно переходить по очереди к разным СК. После проведения каждого преобразования СК, соответствующей некоторому физическому существу шарниру, можно указывать характеристики возникающих при этом сил, например сил упругости или вязкого трения. В языке «Вывод ММ» приняты так называемые правые системы координат, т. е. системы, для которых совмещение положительного направления оси X с положительным направлением оси Y

* Сольицев Р. Н., Ковтун И. В. Построение на ЦВМ в аналитическом виде математических моделей устройств систем управления, JL, 1983.

осуществляется поворотом против часовой стрелки, если смотреть со стороны положительного направления оси Z.

Текущая СК имеет следующие атрибуты: угловую и линейную скорости в проекциях на свои оси, вектор отстояния начала текущей СК от начала исходной СК в проекциях на оси исходной СК, а также матрицу направляющих косинусов (МНК), определяющую ориентацию осей текущей СК относительно исходной. Оси координат нумеруются числами 1, 2, 3. Учитывая, что в ПОЯ используются правые СК, совмещенные 2-й оси со стороны 1-й оси происходит против часовой стрелки.

По умолчанию атрибуты исходной СК считаются нулевыми, а МНК соответственно представляет собой единичную матрицу. Для задания требуемых значений атрибутам СК используется оператор присваивания: УГЛОВАЯ СКОРОСТЬ = A, B, C; ЛИНЕЙНАЯ СКОРОСТЬ = A, B, C; ОТСТОЯНИЕ = A, B, C, где A, B, C — любые выражения. Переход от одной системы координат к другой осуществляется с помощью двух базовых преобразований: поворота СК и переноса начала СК. При этом параметры преобразований — угол при повороте или вектор при переносе — могут быть постоянной величиной, известной функцией времени либо неизвестной функцией времени. К числу последних, в частности, относятся переменные, изменение которых полностью определяет поведение исследуемого объекта. Такие переменные носят название обобщенных координат. Для выделения идентификаторов обобщенных координат служит оператор ОБОБЩЕННАЯ КООРДИНАТА X. Базовые преобразования СК реализованы в виде следующих операторов: ПОВЕРНУТЬ ВОКРУГ ОСИ N НА УГОЛ A; ПЕРЕНЕСТИ НА A, B, C; ВРАЩАТЬ ВОКРУГ ОСИ N СО СКОРОСТЬЮ A.

Здесь N — число, соответствующее номеру оси поворота (N = 1, 2, 3). Эти операторы преобразуют атрибуты текущей СК указанным выше способами.

При задании постоянного угла поворота можно отметить его малость, например: ПОВЕРНУТЬ ВОКРУГ ОСИ N НА ПОСТОЯННЫЙ МАЛЫЙ УГОЛ A. Если угол поворота задается идентификатором и не оговорено противоположное, то по умолчанию угол считается переменным, зависящим от времени. В общем же случае для установления зависимости от времени используется оператор ЗАВИСЯТ ОТ ВРЕМЕНИ: X, Y, Z, ... По умолчанию роль независимой переменной — времени — выполняет идентификатор T.

Описание системы координат сопровождается заданием таких характеристик, как масса и моменты инерции. Масса тела задается в СК, начало которой связано с центром масс тела. Для этой цели служит оператор присваивания МАССА = A.

Результатом действия этого оператора будет создание выражений для приращений кинетической и потенциальной энергии.

Моменты инерции задаются в СК, начало которой связано не только с центром инерции, но и с центром масс определяемого тела. В противном случае можно не учесть влияния потенциальных сил тяжести на данное тело или дважды учесть его инерционные свойства. Для задания моментов инерции используется оператор присваивания МОМЕНТЫ ИНЕРЦИИ = A, B, C.

Потенциальная энергия сил упругости появляется при задании коэффициента упругости КОЭФФИЦИЕНТ УПРУГОСТИ = A; который вместе с величиной последнего смещения или поворота составит соответственно приращение потенциальной энергии. Предполагается, что данные величины характеризуют величину деформации упругих элементов.

Вязкое трение при перемещении или повороте одного тела относительно другого можно учесть заданием соответствующего коэффициента оператором КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ = A; Этот оператор, используя скорость последнего поворота или переноса, образует приращение диссипативной функции.

Оператор ОБОБЩЕННАЯ КООРДИНАТА X; не только выделяет X из числа прочих идентификаторов, указывает его зависимость от времени, но и определяет, что все силы, вводимые после оператора, действуют именно по указанной координате. Это относится и к возмущающим воздействиям, задаваемым оператором ВОЗМУЩАЮЩЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ = A; и к моментам управления, определяющим, например, воздействие электрической части электромеханической САР на механическую. Моменты управления задаются оператором МОМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ = A; Оператор ОБОБЩЕННАЯ СИЛА = A; позволяет самостоятельно задавать обобщенные силы, действующие по координатам. В зависимости от цели построения ММ уравнения движения объектов проектирования можно получать в формах (3.7), (3.10), (3.15). Уравнения строятся в результате применения операторов ПОСТРОИТЬ СИСТЕМУ УРАВНЕНИЙ В ФОРМЕ ЛАГРАНЖА (3.7); ПОСТРОИТЬ СИСТЕМУ УРАВНЕНИЙ В МАТРИЧНОЙ ФОРМЕ (3.15); ПОСТРОИТЬ СИСТЕМУ УРАВНЕНИЙ В ФОРМЕ КОШИ (3.10).

Если форма уравнений не указывается, то по умолчанию вывод осуществляется в форме Лагранжа. Для контроля результатов используются операторы вывода ВЫВ. КИНЕТИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ; ВЫВ. ПОТЕНЦИАЛЬНУЮ ЭНЕРГИЮ; ВЫВ. УГЛ. СКОРОСТЬ, ЛИНЕЙН. СКОР.; ВЫВ. ДИССИП. ФУНКЦИЮ; ВЫВ. ОТСТОЯНИЕ; ВЫВ. УСКОР. ПОЛЯ ТЯЖЕСТИ; ВЫВ. СИСТЕМУ УРАВНЕНИЙ; а также отдельные составляющие перечисленных величин, например. ВЫВ. УГЛ. СКОР. (1 ПРОЕКЦИЯ). ПРАВУЮ ЧАСТЬ УРАВНЕНИЯ 3.

Для улучшения наглядности результатов в качестве элементов вывода можно использовать следующие операторы: СТРОКА (N), ПРОБЕЛ (N) C, РЕЖИМ (N); что обеспечит пропуск N строк,

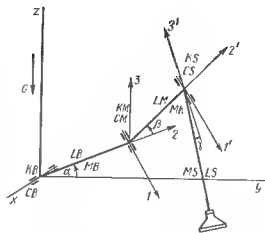


Рис. 4.3. Кинематическая схема звеньев ноги робота

Н пробелов, вывод на печать строки G, печать выражений, обычную при $N=1$ и с предварительной распечаткой общих подвыражений при $N=2$. По умолчанию рассчитываются общие подвыражения.

В результате получается система дифференциальных уравнений.

Для записи созданных уравнений в библиотеку пользователей на магнитном диске используются операторы: ЗАПИСАТЬ A; ЗАПИСАТЬ A (T1, T2, ..., TN); где A — имя, присваиваемое переменной состояния, общие координаты.

Для прочтения записанных уравнений используются операторы: ПРОЧИТАТЬ A; ПРОЧИТАТЬ A (T1, B1, T2, B2, ..., TN, BN); где T1 — идентификаторы в записанных уравнениях; B1 — идентификаторы, заменяющие T1 при чтении, $i=1, 2, \dots, N$.

Пример 4.2. Вывод уравнений движения ноги шагающего робота.

Проведем вывод полной ММ ноги робота на ПОЯ «Вывод ММ» в соответствии с кинематической схемой, представленной на рис. 4.3, где введены обозначения: G — ускорение силы тяжести, KB, KM, KS — коэффициенты трения в соответствующих шарнирах, CB, CM, CS — приведенные коэффициенты упругости, LB — база «бедренного» сустава, LM — длина «бедр», LS — длина «голеней», MB, MK, MS — приведенные массы «бедренного сустава», «голеней», «ступени». На рис. 4.4 приведена полученная на АЦПУ ЭВМ распечатка вывода ММ. В уравнениях 1, 2, 3 введены следующие идентификаторы: ALFA, BETA, GAMMA — переменные $\alpha, \beta, \gamma, \alpha', \beta', \gamma'$.

§ 4.3. Упрощение и преобразование математических моделей на ЭВМ

Основная цель при построении ММ — получение ММ, соответствующих целям исследования или выполняемой проектной процедуре, — достигается путем упрощения и преобразования полной ММ, построение которой показано в предыдущем параграфе.

Почему же нельзя использовать «полные» ММ непосредственно? Полные ММ, как правило, являются избыточными в смысле их применения, они содержат множество «лишних» элементов, затуманивающих, маскирующих суть дела, дальнейшее их использование в инструментах САПР приводит к вычислительным сложностям, большим расходам средств. Например, полные уравнения

/* ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НОГИ ШР */

Ускор поля тиз 0,0, G,
общ. коорд ALFA;
поверх.вокр.оси Z на уг. ALFA; коэф.трени.-KB;
коэф.упр.-CB; момент управления-M1;
перен.на 0, LB, 0, масса-MB.
общ. коорд BETA
поверх.вокр.оси 1 на уг. BETA. коэф.трени.-KM;
коэф.упр. CM, момент управления-M2;
перен.на 0, LM, 0, масса-MK.
общ. коорд GAMMA,
поверх.вокр.оси 1 на уг. GAMMA; коэф.трени.-KS;
коэф.упр. CS; момент управления M3;
перен.на 0, LS, 0; масса MS.
построить систему уравнений, выв. сист. уравнений;
систему уравнений назвать FOOT, записать FOOT

СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ

Уравнение 1

```
MB*LB*LB*ALFA -MK*((LM*BETA)*SIN(BETA))*(-ALFA*LB*ALFA)*
COS(BETA)*LM)+(LB*ALFA LM*(ALFA *COS(BETA)-BETA)*
SIN(BETA)*ALFA))*((LB*LM*COS(BETA)))+MS*((LM*BETA)*SIN(
BETA)LS*(GAMMA *SIN(GAMMA)*COS(BETA) BETA *SIN(BETA))*
COS(GAMMA) GAMMA *COS(GAMMA)*SIN(BETA) BETA *COS(BETA)*SIN(
GAMMA))*((ALFA*LB*ALFA *COS(BETA)*LM (ALFA *COS(BETA)*
COS(GAMMA) ALFA *SIN(BETA)*SIN(GAMMA)*LS)+(LB*ALFA *
LM*(ALFA *COS(BETA) BETA *SIN(BETA)*ALFA)LS*((ALFA *COS(
BETA) BETA *SIN(BETA)*ALFA)*COS(GAMMA)-GAMMA *SIN(GAMMA)*
ALFA *COS(BETA) (ALFA *SIN(BETA)+BETA *COS(BETA)*ALFA))*
SIN(GAMMA) GAMMA *COS(GAMMA)*ALFA *SIN(BETA)))+(LB*LM*
COS(BETA)LS*(COS(BETA)*COS(GAMMA)+SIN(BETA)*SIN(GAMMA)))-
M1 KB*ALFA CB*ALFA
```

Уравнение 2

```
MK*LM*LM*BETA''+0.5*MS*((2*(LM*GAMMA *COS(GAMMA)+BETA*LM*
SIN(GAMMA))*LM*BETA *SIN(GAMMA)+GAMMA *COS(GAMMA)*BETA *
LM)*SIN(GAMMA)+LM)*2*(LB*GAMMA *SIN(GAMMA)+BETA *LM*
COS(GAMMA) (BETA *GAMMA *SIN(GAMMA)+LM*BETA *COS(GAMMA) GAMMA *SIN(
GAMMA)+BETA *LM*LS*(BETA *GAMMA *SIN(GAMMA)+LM*LS))
MK*LM*ALFA *SIN(BETA)*ALFA *LB*ALFA *COS(BETA)*LM*MS*
((LM*ALFA *SIN(BETA)LS*(ALFA *SIN(BETA)*COS(GAMMA)-ALFA *
COS(BETA)*SIN(GAMMA)))+(ALFA *LB*ALFA *COS(BETA)*LM*(ALFA *
COS(BETA)*COS(GAMMA) ALFA *SIN(BETA)*SIN(GAMMA)+LS)
M2 MK*BETA CM*BETA-MK*G*LM*LS*(COS(BETA)+SIN(GAMMA)*LS)
LS*(COS(BETA)*COS(GAMMA) SIN(BETA)*SIN(GAMMA))
```

Уравнение 3

```
MS*LS*(LM*BETA *COS(GAMMA) GAMMA *SIN(GAMMA)+BETA *LM*LS*
(BETA *GAMMA *SIN(GAMMA)))+(SIN(0.5)*MS*((2*(ALFA *SIN(BETA)*
COS(GAMMA) ALFA *COS(BETA)*SIN(GAMMA))*ALFA *LB*ALFA *
COS(BETA)*LM (ALFA *COS(BETA)*COS(GAMMA)-ALFA *SIN(BETA)*
SIN(GAMMA))*LS)+2*BETA *LM*MS*(GAMMA)*BETA *LM*SIN(GAMMA)-2*
BETA *LM*SIN(GAMMA)*BETA *LM*MS*(GAMMA)*(BETA *GAMMA *LS)
M3 KB*GAMMA CS*GAMMA MS*G*LS*(COS(BETA)*COS(GAMMA)-
SIN(BETA)*SIN(GAMMA))
```

Рис. 4.4. Построение ММ ноги ШР

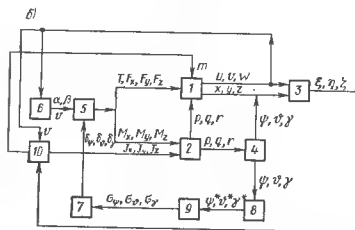
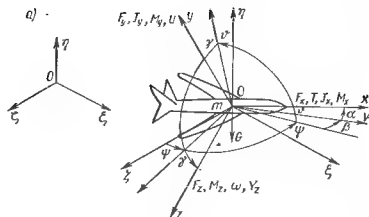


Рис. 4.5. Структурная схема «полной» модели ЛА

движения ЛА (рис. 4.5, а) представленные в виде схемы на рис. 4.5, б, включают в себя: уравнения линейных перемещений ЛА как твердого тела относительно земной системы координат O, ξ, η, ζ в трех взаимно перпендикулярных направлениях под действием сил тяги T , аэродинамических сил $F(F_x, F_y, F_z)$ в поле тяжести с ускорением G (блок 1); уравнения поворотов относительно центра тяжести в трех направлениях под действием аэродинамических моментов $M(M_x, M_y, M_z)$ (блок 2); кинематические уравнения движения центра тяжести ЛА по отношению к земной системе координат ξ, η, ζ (блок 3); кинематические уравнения вращения ЛА относительно центра тяжести на углы крена γ , тангажа ψ и курса ϕ (блок 4); уравнения аэродинамических сил и моментов (блок 5); уравнения скорости v , углов скольжения β и атаки α ЛА (блок 6); уравнения рулевых органов $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ (блок 7); уравнения устройств навигации (блок 8) и БЦВМ (блок 9); уравнения, определяющие изменения массы m и момен-

тов инерции J_x, J_y, J_z в зависимости от потребления горючего (блок 10).

Этот далеко не полный перечень уравнений, соответствующих ММ ЛА, приводит в конечном счете к ММ в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений в форме Лагранжа (3.7) более чем 100-го порядка с несколькими тысячами членов.

В процессе проектирования САУ ЛА такой полной ММ пользуются только на этапах испытаний всей САУ. Для многих проектных процедур расчета, анализа и синтеза САУ применяются упрощенные ММ в формах (3.15), (3.17), (3.16) и др., которые оказываются вполне достаточными для целей этих проектных процедур, но неизмеримо проще полной ММ. Так, при предварительном расчете траектории движения центра тяжести ЛА «О», по отношению к земной системе координат ξ, η, ζ рассматриваются уравнения блока 3, а остальные уравнения не учитываются; при расчете динамической устойчивости ЛА исследуются только уравнения блоков 2, 4, 8, 9, 7, причем с разделением на продольное и боковое движения соответственно в вертикальной и горизонтальной плоскости, и т. д.; аналогичные упрощенные ММ применяются при проектировании ГСП.

Полная ММ ГСП целесообразна на этапах испытаний ГСП и в некоторых других проектных процедурах, а для большинства расчетных проектных процедур пользуются упрощенными ММ в виде трех несвязанных систем линейных уравнений в формах (3.15), (3.17).

На протяжении «жизненного цикла» проектируемого объекта требуется приводить его ММ в соответствие с непрерывно меняющейся информацией об этом объекте, т. е. постоянно решать задачу упрощения и преобразования форм в том или ином объеме.

Под упрощением математической модели в САПР будем понимать проектную процедуру П преобразования исходной математической модели M в упрощенную M_i , эквивалентную M с точки зрения цели исследования.

Можно выделить следующие основные подходы к решению задачи упрощения ММ.

Редукция:

$$M \rightarrow M_1 \rightarrow M_2 \rightarrow \dots \rightarrow M_n, C(M_i) > C(M_{i+1}), i = \overline{1, n}. \quad (4.32)$$

Исходная модель M последовательно редуцируется к упрощенным моделям M_i меньшей сложности $C(M_i)$. Эта процедура предполагает исключение не влияющих на результат исследований и расчетов составляющих ММ.

Декомпозиция:

$$M = \{M_1, M_2, \dots, M_n\}, C(M_i) < C(M). \quad (4.33)$$

Здесь, так же как и в (4.32), $C(M_i)$ — некоторая мера сложности ММ (порядок системы уравнений, число слагаемых, число

арифметических операций, требуемая память, время счета и т. д.). Операция (4.33) предполагает возможность разбиения исходной ММ на ряд частных моделей. Применительно к задаче упрощения ММ это может соответствовать выделению n упрощенных моделей M_i , соответствующих n целям исследования. Ниже рассматриваются некоторые методы и вытекающие из них алгоритмы упрощения ММ.

Ряд алгоритмов строится на основе метода возмущений. Основоположником этой группы методов был А. Пуанкаре (французский математик и механик, 1854 - 1912), впервые применивший метод возмущений для решения задач теории устойчивости.

Основой метода является положение, что некоторые динамические связи в модели могут игнорироваться, т. е. исходная модель может аппроксимироваться моделью, структура которой проще.

Рассмотрим применение метода возмущений к упрощению первого уравнения системы уравнений (3.15) в случае наличия в ней малого параметра $\epsilon > 0$. Если эту систему можно представить в виде

$$\begin{bmatrix} \dot{Z}_1 \\ \dot{Z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & \epsilon A_{12} \\ \epsilon A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 & 0 \\ 0 & B_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix},$$

где A_{11} , A_{12} , A_{22} , B_1 , B_2 — соответствующие блоки матриц A , B системы уравнений (3.15); Z_1 , Z_2 — векторы фазовых координат, то, очевидно, сложность ММ не вычислительные затраты при $\epsilon \rightarrow 0$ сокращаются, так как система распадается на две независимые подсистемы меньшей размерности.

В случае приводимости уравнения (3.15) к виду

$$\dot{Z}_1 - A_{11}Z_1 + A_{12}Z_2; \quad \epsilon \dot{Z}_2 - A_{21}Z_1 + A_{22}Z_2 \quad (4.34)$$

при $\epsilon \rightarrow 0$ второе уравнение вырождается в алгебраическое, т. е.

$$\begin{aligned} \dot{Z}_1 - (A_{11} - A_{12}A_{22}^{-1}A_{21})Z_1; \\ Z_2 = -A_{22}^{-1}A_{21}Z_1. \end{aligned} \quad (4.35)$$

Снижение сложности системы (4.35) по отношению к системе (4.34) здесь также очевидно.

Одна из особенностей ММ широкого класса САУ заключается в их нелинейности. Наиболее распространенным методом упрощения этих ММ является *линеаризация* (см. систему (3.11)). Во многих случаях линейная модель достаточно хорошо отражает физику работы исследуемой системы, а главное, позволяет применить мощный аппарат исследования линейных систем. Кроме того, хорошо известно стремление разработчика строить систему, «работающую» по линейной модели. С точки зрения требуемых аналитических операций при автоматизации этого метода необхо-

димы элементарные подстановки, аналитическое дифференцирование, тождественные преобразования.

Ряд преимуществ с точки зрения машинной реализации имеют методы упрощения, сводящие дифференциальные уравнения к системам конечных, в частности алгебраических, уравнений.

Одним из таких методов является предложенный автором машинно-аналитический метод [13]. Сущность его сводится к следующему. Пусть ММ задана в форме (3.7), которую представим здесь в виде

$$\begin{aligned} \dot{Y} &= F(Y, A, t); \\ |Y - Y_0| &\leq D_1; \end{aligned} \quad (4.36)$$

$$|A - A_0| \leq D_2, \quad t_0 < t < t_1.$$

где $F(Y, A, t) = [f_1(Y, A, t), f_2(Y, A, t), \dots, f_n(Y, A, t)]$ — заданная в области D вещественная функция от Y, A, t ; $Y(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)]$ — вещественная вектор-функция из фазовых координат системы; $A(t) = [a_1(t), a_2(t), \dots, a_n(t)]$ — вектор, составленный из параметров системы, включая входные сигналы и начальные условия. Полученные на ЭВМ в результате численного решения системы (4.36) при заданных значениях параметров фазовые координаты обозначим $\bar{Y}(t)$. В соответствии с машинно-аналитическим методом (подробнее этот метод будет изложен в гл. 6) функции «машинные решения» исходной системы (4.36) аппроксимируются аналитическими функциями и представляются в виде

$$\bar{Y} = \varphi(t, S), \quad (4.37)$$

где $S = (s_1, s_2, \dots, s_d)$ — вектор, составленный из характеристических параметров аппроксимирующих функций $\varphi(t, S)$ (например, вектор из n, Ω в функциях $e^{st}, \sin \Omega t, e^{st} \cdot \sin \Omega t$).

По исходным уравнениям (4.36) и аппроксимациям машинных решений (4.37) в результате определения процесса последовательных приближений (см. гл. 6) в аналитическом виде получается зависимость

$$\Phi(S, A, t) = 0, \quad (4.38)$$

связывающая характеристики процессов в системе с ее параметрами. Эта зависимость представляет собой уже конечные уравнения, по которым значительно проще, чем по исходным дифференциальным (4.36), проводится исследование и расчет САУ и их устройств.

Уравнения (4.38) могут быть также использованы для упрощения исходных дифференциальных (4.36) путем их редукции, т. е. исключения, «малозначущих» в смысле цели их применения членов уравнений, параметров. В этом случае по зависимости (4.38),

называемой определяющим уравнением, при условии $\left| \frac{\partial \Phi}{\partial S} \right|^{-1} \neq 0$ строится матрица чувствительности характеристик процессов к изменению параметров Λ :

$$\frac{\partial S}{\partial \Lambda} = \left[\left(\frac{\partial S}{\partial \Lambda} \right)_{ik} \right]_{\substack{i=1,2,\dots,d \\ k=1,2,\dots,m}} = - \left[\frac{\partial \Phi}{\partial \Lambda} + \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right] \left[\frac{\partial \Phi}{\partial S} \right]^{-1}. \quad (4.39)$$

Так как параметры САУ имеют различные размерности и значительные диапазоны изменения, то удобнее пользоваться логарифмическими или полулוגарифмическими коэффициентами чувствительности $\frac{\partial (\ln S)}{\partial (\ln \Lambda)}$ и $\frac{\partial S}{\partial \ln \Lambda}$.

В соответствии с матрицей чувствительности (4.39) осуществляется редукция исходной модели (4.36) и построение k -го приближения упрощенной эквивалентной модели

$$\dot{Y}_s^{(k)} = F_s^{(k)}(Y_s^{(k)}, \Lambda, t).$$

При этом должны быть заданы диапазоны изменения и точные определения каждого из параметров Λ исходной системы и критерий оценки близости исходной и эквивалентной моделей.

В качестве такого критерия выбирается математическое ожидание квадрата разности векторов $\bar{Y}$ и $\bar{Y}_s$.

$$U(\Lambda) = \frac{1}{T} \int_0^T [\bar{Y}(t) - \bar{Y}_s(t)]^2 dt \quad (4.40)$$

в течение заданного промежутка времени $0 \leq t \leq T$.

На рис. 4.6 приведена схема операций упрощения ММ на основе соотношений (4.36) — (4.40). Приведенные алгоритмы упрощения реализуются в САПР средствами специального ПОЯ «Упрощение и преобразование ММ» и соответствующего пакета программ*. Перейдем к изложению такого ПОЯ.

Программа на ПОЯ «Упрощение и преобразование ММ» представляет собой последовательность операторов, разделенных точкой с запятой. Основным понятием языка является понятие ММ, в качестве которой могут выступать следующие математические объекты:

системы уравнений — дифференциальные, дифференциально-алгебраические, алгебраические;

— матрицы систем (3.11), (3.15), (3.16), матрица чувствительности (4.39);

* Сольщев Р. И., Андреев С. Н., Пресняк А. С. Аналитико-численные методы в САПР/ЭВМ в проектировании и производстве, 1987, Вып. 3, С. 165—186.

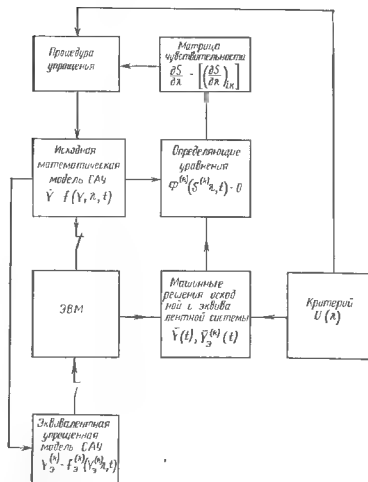


Рис. 4.6. Схема операций при упрощении ММ

— скалярные выражения, т. е. выражения энергий T , U , R в (4.29), характеристический полином (ХП), передаточная функция (ПФ). Первичными объектами являются уравнения, описывающие поведение системы и энергетические характеристики. Остальные объекты являются производными от первых.

Большинство операторов такого ПОЯ, выполняющих то или иное преобразование ММ, предполагает следующую структуру: вначале следует действие, обозначающее некую операцию над ММ (построить, привести, ...), затем признак математического объекта (матрица, уравнения, ...) и, наконец, проблемный признак (уравнения чувствительности, передаточная функция ...). Иногда отсутствует указание на используемый метод, алгоритм и т. д. Операции могут производиться над некоторой «текущей» ММ.

Программа на ПОЯ «Упрощение и преобразование ММ» — это описание последовательных тождественных и нетождественных преобразований ММ. Как уже отмечалось, выполнение последних предполагает задание некоторой дополнительной числовой информации, количественно определяющей условия, накладываемые на преобразуемую ММ.

Задание ММ на этом ПОЯ выполняется с помощью операторов: СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ; ...; ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ; ...; и др. Например, СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ: $A \cdot X'' + B \cdot X' \cdot Y \cdot \sin(X) = P \cdot \sin(W \cdot T); D \cdot Y'' \cdot \cos(X) + Z \cdot \cos(Y) = R$; ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ: $Y = (A \cdot S + C) / (D \cdot S^2 + F \cdot S + D) \cdot X$; КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ: $0.5 \cdot (A \cdot X')^2$; где S — оператор ЛАПЛАСА; A, B, C, D, P, E, R — идентификаторы коэффициентов; X, Y, Z, T — переменные; $X', \dots, Y''$ — производные по времени. ММ может содержать любую комбинацию таких функций, как $\sin, \cos, \lg, \ln, \log, \arcsin, \arccos, \arctg, \text{sign}, \text{abs}, \exp$, и операторы дифференцирования $\text{dif}()$.

Для контроля и анализа результатов в языке существует оператор вывода, позволяющий

ВЫВЕСТИ МАТРИЦУ, ПЕРЕДАТОЧНУЮ ФУНКЦИЮ, ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЙ ПОЛИНОМ, КИНЕТИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ, ПОТЕНЦИАЛЬНУЮ ЭНЕРГИЮ, ДИССИПАТИВНУЮ ФУНКЦИЮ, СИСТЕМУ УРАВНЕНИЙ, УРАВНЕНИЕ;

Задание оператора РЕЖИМ ПЕЧАТИ: N обеспечивает печать выражений обычную ($N=1$) и с предварительной распечаткой общих подвыражений ($N=2$). Операторы ПРЕОБРАЗОВАТЬ КИНЕТИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ, ПОТЕНЦИАЛЬНУЮ ЭНЕРГИЮ, ДИССИПАТИВНУЮ ФУНКЦИЮ, МАТРИЦУ, СИСТЕМУ УРАВНЕНИЙ, ПЕРЕДАТОЧНУЮ ФУНКЦИЮ в целях повышения наглядности позволяют выполнять тождественные преобразования (приведение подобных членов и др.).

Преобразования форм моделей осуществляются в результате задания следующих операторов:

1. ОПРЕДЕЛИТЬ ПЕРЕДАЧУ ОТ $U, W, \dots, V, K, Y, \dots, Z$; где $U, W, \dots, Y, \dots$ — любые идентификаторы. Этот оператор, в частности, по заданной системе дифференциальных уравнений (3.11) в форме Коши позволяет построить передаточную матрицу от входов U, W к выходам Y, Z (в частности, передаточную функцию).

2. ПЕРЕЙТИ К СИСТЕМЕ УРАВНЕНИЙ;

Здесь выполняется действие, противоположное оператору 1.

3. ПРИВЕСТИ К ФОРМЕ КОШИ;

Этот оператор выполняет преобразование к форме Коши СДУ, заданных в форме (3.9).

4. ОПРЕДЕЛИТЬ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЙ ПОЛИНОМ (ХП);

По этому оператору при заданной матрице A в (3.15) или A^* в (3.11) строится ХП.

5. ПОСТРОИТЬ МАТРИЦУ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ; позволяющий по заданным спискам параметров и характеристик, определяющим уравнениям (4.38) построить соответствующую матрицу чувствительности (4.39).

До сих пор описывались операторы, осуществляющие тождественные преобразования, позволяющие получать математически равносильные (эквивалентные) ММ. Перейдем теперь к операторам, осуществляющим упрощение ММ путем нетождественных преобразований.

Нетождественные упрощающие преобразования ММ производятся следующими операторами:

1. ЛИНЕАРИЗОВАТЬ СИСТЕМУ УРАВНЕНИЙ (режим N); Выполняется линеаризация СДУ в форме Коши ($N=1$) или в форме Лагранжа ($N=2$);

2. УПРОСТИТЬ ПЕРЕДАТОЧНУЮ ФУНКЦИЮ (порядок N); Понижается порядок передаточной функции до заданного порядка.

3. ПОСТРОИТЬ N -Е ПРИБЛИЖЕНИЕ;

Оператор позволяет строить N -е приближение модели, где N соответствует порядку малости слагаемых.

4. УПРОСТИТЬ В ТОЧКЕ (режим CN), где N соответствует различному нормированию слагаемых в одном уравнении системы ($N=1$ — к сумме их модулей, $N=2$ — к модулю максимального слагаемого). Результатом применения данного оператора является система уравнений, редуцированная в заданной характерной точке ММ по заданному относительному порогу.

5. УПРОСТИТЬ В ОБЛАСТИ (РЕЖИМ U); выполняет те же функции, но используя заданные диапазоны изменения величин. При $N=1$ выполняется интервальная оценка слагаемых, при $N=2$ выполняется оценка выражений в нескольких точках, равномерно распределенных в рассматриваемых диапазонах.

Пример 4.3. Упрощение ММ «ноги шагающего робота.

«Полная» ММ ноги ЦП выведена в примере 4.3. Существенное упрощение этой ММ для целей предварительного анализа САУ. Соответствующие операторы ПОЯ «Упрощение и преобразование ММ» и упрощенная ММ приведены на рис. 4.7 в виде «распечатки», полученной на АЦПУ ЭВМ.

§ 4.4. Подсистема САПР САУ «Построение математических моделей»

В гл. 3 было показано, что «Построение ММ» как инструмент разработки САУ входит в состав САПР САУ в качестве подсистемы, включающей в себя все семь компонентов (см. рис. 3.3). Компонент технических средств (ТС) включает в себя АЦД для ввода исходных данных (кинематическая и электрическая схемы,

УПРОЩЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НОГИ ШР

Восстановить систему уравнений FOOT:

заменить $\sin(\alpha) \Rightarrow \alpha$, $\cos(\alpha) \Rightarrow 1$.

$$\sin(\text{BETA}) \Rightarrow \text{BETA}, \cos(\text{BETA}) \Rightarrow 1.$$

SIN(GAMMA) -> GAMMA, COS(GAMMA) => 1.

малые величины: ALFA , BETA , GAMMA , ALFA' , BETA' , GAMMA' ;

построить 2-е приближение,

ВВЕСТИ СИСТЕМУ УРАВНЕНИЙ:

линеаризовать систему уравнений:

ВЫВЕСТИ СИСТЕМУ УРАВНЕНИЙ

СИСТЕМА УРАВНЕНИЯ (2 е приближение)

УДВРЕННЕ 1

$$MB*LB*LB*ALFA + MK*(LB*ALFA^LM*ALFA^LM)*(LB*LM)+MS*(LB*ALFA^LM*ALFA^LM*ALFA^LM*ALFA^LM*BETA*GAMMA))*(-LB-LM-LS*(1-BETA*GAMMA)) - M1 KB*ALFA CB*ALFA$$

Уравнение 2

$$MK*LM*LM*BETA' + 0.5*MS*(2*LM*BETA' *GAMMA*GAMMA*LM*2*(LM*BETA' +LS*BETA' +GAMMA))*(LM+LS)) = M2-KM*BETA'-CM*BETA'$$

$$MK*G*LM MS*G*(LM+LS*(1-BETA*GAMMA))$$

Уравнение 3

$$MS*LS*(LM*BETA + LS*(BETA + GAMMA^{-1})) =$$

СИСТЕМА УРАВНЕНИЯ (Линейная система уравнений)

Уравнение 1

$$CB*ALFA+KB*ALFA - M)$$

Уравнение 2

$$(MK*LM+LM+MS*(LM+LS)*(LM+LS))*BETA'+MS*(LM+LS)*LS*GAMMA'+CM*BETA+KM*BETA' = M2 MK*G*LM-MS*G*(LM+LS)$$

Уравнение 3

$$MS*(LM+LS)*LS*BETA + MS*LS*LS*GAMMA + CS*GAMMA + KS*GAMMA$$

Рис. 4.7. Упрощение ММ «ноги» ШР

структура САУ и ее устройств), вывода ММ в аналитической или графической формах на ГП, АЦПУ. Компоненты математического обеспечения (МО) содержат типовые ММ САУ и ее устройств, методы и алгоритмы построения ММ, приведенные в § 4.1–4.4. Компоненты лингвистического обеспечения (ЛО) содержат ПОЯ «Вывод ММ», «Упрощение и преобразование ММ» (см. § 4.2, 4.3), языки программирования, на которых составляются программные модули ППП и системные программы (ПЛ/1, СИ, Ассемблер). Соответствующим содержанием наполняются и остальные пять компонентов этого инструмента, позволяющего получить ММ САУ и ее устройств в зависимости от целей применения ММ в проектных процедурах.

Разработчики САУ предъявляют к этому инструменту ряд требований, в том числе следующие: 1) модель должна соответствовать проектной процедуре и отражать существенные только для этой процедуры свойства изучаемого объекта; 2) модель должна быть адекватна конкретным САУ, их устройствам и элементам при минимальных затратах на ее получение средствами САПР.

Применение инструмента «Построение ММ» осуществляется двумя способами: заполнение, воспроизведение и хранение рекуантов, известных по результатам предыдущих исследовательских и проектных работ в соответствующих базах данных (БД) (см. § 3.6), с возможностью запроса и вызова нужной ММ при выполнении проектной операции; построение, упрощение и преобразование ММ в аналитическом виде по заданным кинематической и электрической схемам и другим характеристикам устройств САУ с дальнейшей их идентификацией по сигналам, снимаемым с реальных САУ и их элементов.

Остановимся вначале на первом способе применения инструмента «Построение ММ». Для реализации ММ в БД необходимо снабдить их признаками, с одной стороны, связанными с классификацией САУ и их элементов, а с другой — с формами ММ (3.1) — (3.23).

Для размещения, поиска и выдачи ответов на запросы пользователя в БД необходим дескрипторный словарь ММ САУ, из устройств и элементов, предназначенный для кодирования признаков, по которым вызываются и формируются ММ. Дескриптор здесь можно определить как лексическую единицу проблемно-ориентированного языка (ПОЯ) проектировщика, представляющую определенный элемент, понятие. Дескрипторный словарь ММ САУ зависит от установившейся классификации САУ и их устройств и элементов, специфики конкретного предприятия, проектирующего САУ, и принятого способа декомпозиции САУ на элементы.

Помимо признаков, выделяющих конкретную САУ, ее устройства и элементы, в дескрипторный словарь вводятся признаки формы ММ САУ, в том числе формы (3.7) (3.23). Это необходимые характеристики для установления соответствия множества

М множествам О и К при выполнении конкретной проектной процедуры П (М, О, К).

Процедурой, применяемой при составлении ММ САУ из готовых компонентов, является процедура композиции ММ САУ из отдельных взаимосвязанных составляющих: элементов, блоков, устройств. Эта процедура осуществляется инструментом «Построение ММ» в диалоговом режиме через алфавитно-цифровой дисплей, причем ПОЯ не всегда требуется, так как в одной из форм диалога проектировщику достаточно заполнить указанные ЭВМ места соответствующей информацией.

Готовые ММ компонентов САУ из реквизитов вводятся в БД пользователем по общим правилам: преобразование первичной информации к канонической форме записи, принятой в БД; преобразование с ПОЯ на язык описания данных (ЯОД); контроль по словарю дескрипторов; ввод в соответствующую БД.

Покажем на приводимых ниже примерах, как осуществляются подготовка и ввод в БД ММ заданных в графической и аналитической формах [14], что соответствует первому и второму уровням иерархии ММ САУ (см. рис. 3.8).

Пример 4.4. Ввод и представление в ЭВМ ММ, заданной структурной схемой.

Модель подсистемы РЧВ САР ТГ в форме структурной схемы приведена на рис. 3.9, б, описание САР ТГ и ее подсистем приведено в параграфе 1.1. Схема содержит девять звеньев, три из которых являются сумматорами, а остальные соответствуют операторам в форме передаточных функций. Изображенную на рис. 3.9, б структурную схему можно закодировать и хранить в ЭВМ, например, следующим способом. Пусть параметры схемы имеют значения: $K_1=1$, $K_2=50$, $K_3=0.85$, $K_4=1.84$, $K_5=-1$, $K_6=-1.3$, $T_1=0.1$, $T_2=0.1$, $T_3=-0.95$, $T_4=4.5$, $T_5=5$.

Структура РЧВ задается массивом пар номеров звеньев $\{(i, j)\}$ (номера звеньев на рис. 3.9, б обведены кружками и находятся под звеньями). Каждая пара (i, j) задает связь между звеньями i и j , при этом первое число i соответствует номеру звена, с выхода которого снимается сигнал, а второе j номеру звена, на вход которого подается сигнал. Для РЧВ массив будет содержать 2 К0 элементов, где К0 9. Этот массив имеет следующий вид: $\{9, 1, 1, 2, 2, 3, 8, 3, 4, 4, 5, 4, 5, 8, 5, 6, 6, 7, 7, 9\}$.

Задание структуры операторов звеньев в том случае, когда операторы представлены передаточными функциями, осуществляется двумя массивами, — степеней полиномов числителей и знаменателей. Сумматор рассматривается как звено с несколькими входами, имеющее передаточную функцию по отношению к каждому входу, равную 1. Для подсистем РЧВ (см. рис. 3.9, б) массив степеней полиномов числителей имеет вид $MC4=\{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0\}$, а для знаменателей $MC3=\{0, 0, 0, 2, 1, 0, 2, 1, 0\}$.

Для представления в ЭВМ полностью определенной модели необходимо к перечисленным выше числам и массивам добавить массивы, кодирующие значения параметров операторов звеньев — коэффициентов полиномов числителей и знаменателей передаточных функций. Для рассматриваемой САР массивы коэффициентов полиномов числителей передаточных функций звеньев имеет вид $\{1, 1, 50, 0.85, 1, 1.84, 0, -1.3, -1\}$, а для знаменателей — $\{1, 1, 1, 0, 1, 1, 0.1, 1, 1, 4.5, 0.95, 1, 5, 1\}$.

Пример 4.5. Ввод и представление в ЭВМ ММ, заданной графом.

Модель САР ТГ, представляемая в форме графа, соответствующего структурной схеме рис. 3.9, б, изображена на рис. 3.10, б. Подсистема РЧВ в этом графе имеет пять вершин, шесть дуг, один управляющий вход x_1 и один выход — вершину y_7 , которой соответствует частота вращения.

Данная модель может быть закодирована и храниться в ЭВМ следующим образом. Структура подсистемы задается числом вершин (переменных) $K_X=5$ (номера вершин совпадают с номерами переменных Y), числом дуг $K_Y=6$ (номера дуг обведены кружками и расположены под соответствующими дугами) и массивом пар номеров переменных $\{(i, j)\}$. Каждой дуге соответствует пара номеров (i, j) в массиве, причем первый номер i показывает номер вершины — начала дуги, а второй j — номер вершины — конца дуги. Для подсистемы РЧВ массив имеет вид $\{1, 3, 3, 4, 4, 5, 5, 7, 4, 3, 7, 1\}$. Количество элементов в массиве равно 2К_Y.

Для дальнейшей конкретизации модели системы следует задать структуру операторов (дуг). В том случае, когда операторы представлены передаточными функциями, их структура задается степенями полиномов числителей и знаменателей так же, как и в примере 4.4. Для графа подсистемы РЧВ (см. рис. 3.10, б) массив степеней полиномов числителей имеет вид $MC4=\{0, 0, 0, 0, 1, 0\}$, а массив степеней полиномов знаменателей — $MC3=\{0, 2, 1, 2, 1, 0\}$.

Для представления в ЭВМ полностью определенной модели необходимо к приведенным выше числам и массивам добавить массивы, кодирующие информацию о значениях параметров операторов дуг — коэффициентов полиномов числителей и знаменателей передаточных функций дуг. Коэффициенты полиномов, располагаемые в массиве коэффициентов полиномов числителей передаточных функций дуг, имеют вид $\{1, 50, 0.85, 1.84, -1.3, -1\}$, а знаменателей — $\{1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 4.5, 0.95, 1, 5, 1\}$.

В случае аналитического представления ММ для хранения ее в памяти ЭВМ удобно воспользоваться предлагаемыми ниже подходами, который мы изложим на приводимом ниже примере 4.6 применительно к форме (3.16) — полиномиальным матрицам, элементами которых являются полиномы от p , где p — оператор дифференцирования $p=d/df$. Систему уравнений (3.16) представим здесь следующим образом:

$$L(p) \cdot Y = R(p) \cdot X, \quad (4.41)$$

где $Y=\{y_i\}$ — вектор переменных, каждая из которых может являться выходной $(n \times 1)$; $X=\{x_j\}$ — вектор входных воздействий, $(r \times 1)$; $L(p)$, $R(p)$ — полиномиальные матрицы $(n \times n)$, $(n \times r)$.

Пример 4.6. Ввод и представление в ЭВМ ММ, заданной полиномиальными матрицами (4.41).

Будем рассматривать ту же САР ТГ, что и в примерах 4.4, 4.5 (см. рис. 3.9, б). Каждому звену системы будет соответствовать одно уравнение. Номер переменной будет равен номеру звена, выходом которого является данная переменная. Таким образом, число переменных будет равно числу звеньев структурной схемы. Полиномиальная матрица L описывает модель собственно системы управления и имеет следующий вид:

$$L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -50 & 0.1p^2 + p & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.85 & 0.1p + 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1.84 & 0.95p^2 + 4.5p + 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1.3p & 0 & 0 & 0 & 5p + 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Матрица $R(p)$ в данном случае имеет вид $R \rightarrow \{1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0\}$.

Полномощные матрицы систем управления обычно являются сильно разреженными, т. е. содержат много нулевых элементов, поэтому в памяти ЭВМ целесообразно хранить и использовать в алгоритмах только ненулевые элементы.

Модель РЧВ в форме полиномиальных матриц может быть закодирована и храниться, например, следующим образом. Структура матрицы L задается числом строк (столбцов), которое равно числу звеньев системы КС, и массивом пар индексов $\{(i, j)\}$ ненулевых элементов. Каждому ненулевому элементу соответствует пара индексов (i, j) в массиве, при этом номер i указывает номер строки ненулевого элемента, а номер j — номер столбца. Для РЧВ массив g будет содержать 2xKHL чисел, где KHL — 19 — количество ненулевых элементов матрицы L , и имеет следующий вид: $\{1.1; 1.9; 2.1; 2.2; 3.2; 3.3; 3.8; 4.3; 4.4; 5.4; 5.5; 6.5; 6.6; 7.6; 7.7; 8.4; 8.8; 9.7; 9.9\}$.

Структура операторов элементов матрицы задается массивом степеней соответствующих полиномов, которые содержат KHL чисел, и имеет следующий вид: $\{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 2, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0\}$.

Для представления в ЭВМ полностью определенной модели необходимо к приведенным выше числам и массивам добавить массив, кодирующий информацию о значениях коэффициентов полиномов.

Для подсистемы РЧВ массив коэффициентов полиномов — элементов матрицы L — имеет вид $\{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 50, 1, 0.1, 0.85, 1, 0.1, 1, 1, -1.84, 1, 4.5, 0.95, 0, -1.3, 1, 5, 1.1\}$.

Матрица R , задающая модель связи системы со средой на входе, кодируется аналогичным способом. Структура матрицы R задается числом строк К-9, числом ненулевых элементов KHR=1 и массивом пар индексов ненулевых элементов $\{(1, 1)\}$. Структура операторов элементов матрицы R задается массивом степеней соответствующих полиномов, который содержит KHR чисел и имеет вид $\{0\}$. Массив коэффициентов полиномов — элементов матрицы R — имеет вид $\{1\}$.

Перейдем теперь к построению «новых» ММ по исходным кинематической, электрической и другим схемам САУ, ее устройству и элементов (второй и третий уровень на схеме рис. 3.12). Поскольку компоненты математического и лингвистического обеспечения уже были представлены в § 4.2, 4.3, останавливаясь на соответствующих пакетах программ (ПП). Для реализации «Вывода ММ» и «Упрощения ММ» созданы два соответствующих ПП*.

* ПП и соответствующую документацию можно приобрести в установленном порядке на кафедре САПР ЛИАП по адресу: 196135, Ленинград, ул. Гастелло, д. 15, каф. САПР Ленинградского института авиационного приборостроения.

Ввиду схожести их построения остановимся только на первом. В соответствии с принятой структурой ППО САПР САУ (см. рис. 3.12) этот ПП строится на основе инструментальной системы программных средств. В дальнейшем будем его называть ПП «Вывода уравнений». ПП «Вывода уравнений» предназначен для построения ММ САУ по описанию их кинематической и электрической схем, заданных с помощью ПОЯ «Вывод ММ». Управляющая программа представляет собой совокупность модулей, осуществляющих предварительный сбор и оценивание информации, поступающей из СУТ (см. рис. 3.13). Другие программные модули осуществляют конкретные преобразования согласно действующим операторам, описанным в § 4.2.

Программы, составляющие данный пакт, управляются СУТ, производящим разбор входных данных согласно грамматике ПОЯ «Вывод ММ». Основной программой пакета является управляющая программа. Эта программа осуществляет функции семантического анализатора входной информации, проверяет соблюдение правильного по смыслу порядка следования операторов, других синтаксических единиц, своевременность получения той или иной информации. С другой стороны, управляющая программа содержит и некоторую вспомогательную, сервисную часть, связанную с выводом промежуточных и окончательных результатов. Внутренняя информация, которую преобразует эта программа, включает в себя следующие таблицы: систем координат, векторов угловой и линейной скорости, обобщенных сил и моментов инерции, массы и кинетической энергии и т. д. Управляющая программа преобразует также данные: номер рассматриваемой системы координат, номер первой свободной области в таблице, количество поступающих обобщенных координат в одном операторе задания обобщенных координат, текущее количество обобщенных координат. Семантические подпрограммы служат для распознавания, распределения по таблицам и внутри них данных, поступающих от соответствующих операторов. Например, для оператора СИСТЕМА КООРДИНАТ соответствующая семантическая подпрограмма идет в таблице TAB, хранимой в ЭВМ (NAMES), ния системы координат. Если имя найдено, номер системы координат (NCS) принимает значение, соответствующее найденной системе. Если не найдено, то считается, что указанная в операторе система координат является новой, и происходит ее запись в новую строку TAB, NAMES, а NCS принимает значение номера этой строки.

По оператору ПОВЕРНУТЬ СИСТЕМУ КООРДИНАТ [И], [И], [И], [И], ВОКРУГ ОСИ [И] НА УГОЛ [...] соответствующая

В дальнейшем в § 5.5, 6.4, 7.4 излагаются подсистемы САПР «Моделирование», «Анализ», «Синтез», по которым соответствующие ПП можно приобрести по тому же адресу,

Исходные данные :

: ось :обобщ :вектор :угл :моменты :обобщ :кэфф :мас
N :позо :исорин :перено :скор :инерции :силы :тренинг :са
:rota :nata :sa :rotore :

Текущая система координат		O, X, Y, Z	
: 1	Z : ALF1	: A, B, C	MZ : KALF1
: 2	Y : ALF2	: A1, B1, C1	MY : KALF2
: 3	X : ALF3	: A2, B2, C2	MX : KALF3
: 4			

Текущая система координат	I, X ₁ , Y ₁ , Z ₁	
5: Y ₁ : BET1 :	: PI, Q ₁ , R ₁	MYI - KBET1
6: X ₁ :	: WR1	: JO, J, J

```

. Текущая система координат - O, X, Y, Z
: 7:      :      : 0 0 L :      :

```

```

Текущая система координат : O2,X2,Y2,Z2
В: Z2 : BET2 : : : F2,G2,R2: M22 : KBET2 :
9: X2 : : : WR2 : J0-J-J : :

```

Текущая система координат - O, X, Y, Z

10:	Текущая система координат	03.X3.Y3.Z3
11:	X3 : BET3 :	P3.Q3.R3: M23 : KBET3 :
12:	Y3 :	WR3 :

Вывести систему уравнений I_{II}, заданной кинематической схемой: (см рис 2.8)

Систему уровнейки назвать TG

Записать

Упростить полную модель ГСП; (по критерию см. формулу 4.40)

УПРОЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ГСП

УРАВНЕНИЕ 1

$$\begin{aligned} & (R + B1 + B2 + 0.5M*(2*S*S + Z*L*L) + Q1 + J + M*L*L + Q2 + \\ & J + 0.5M*(2*S*S + 2*L*L) + Q3 + J)*ALF1 + (Q2 + J)*BET2 + \\ & (Q3 + J)*BET3 + KBET2*ALF1 + (-1)*JO*WR2*ALF2 + (JO*WR1 + JO* \\ & WR3)*ALF3 + JO*WR1*BET1 \quad MZ \end{aligned}$$

УРАВНЕНИЕ 2

$$\{A1 + A2 + M*S*S + P1 + J0 + M*L*L + P2 + J + M*S*S + P3 + J0\} * ALF2 + J0 * WR2 * ALF1 + KALF2$$

УРАВНЕНИЕ 3

$$\begin{aligned} & (C2 + M*L*L + R1 + J + R2 + J0 + M*L*L + \\ & R3 + J)*ALF3 - (R1 + J)*BET1 - (J0*WR1 + J0*WR3)* \\ & ALP1 + KALF3*ALF3 + 1*J0*WR3*BET3 - M*G*L + MX \end{aligned}$$

УРАВНЕНИЕ 4

$$(R1 + j\omega L1) * ALF2 + (R1 + j\omega L1) * BET1 - JO * WR1 * ALF1 + KEET1 * BET1 \quad MY1$$

УРАВНЕНИЕ 5

$$(Q2+J)*ALF1 \cdot + (Q2-J)*BET2 \cdot - JO*WR2*ALF2 + KBET2*BET2 \quad MZ2$$

УРАВНЕНИЕ 6

$$(Q3+J)*ALF1 + (Q3+J)*BET3 + J0*WR3*ALF3 + KBET3*BET3 \quad MZ3$$
[illegible]

Рис. 48. Пример проектной документации, изготовленной подсистемой «Построение ММ»

семантическая подпрограмма, подобно предыдущему случаю, находит в табл. TAB NAMES нужную систему координат, затем определяет номер оси поворота, вызывает соответствующую проблемную программу.

Проблемные программы создают в памяти ЭВМ новые аналитические выражения, объединяя или преобразуя исходные. Для этого используются модули ППП «Аналитические преобразования».

Иллюстрацией применения описанного инструмента к изготовлению проектного документа «Математическая модель» является ММ ГСП (рис. 4.8).

На этом рисунке приняты обозначения традиционно применяемые в ММ САР ГСП (см. рис. 2.8):

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ — углы стабилизации ГСП и прецессии гироскопов, их первые и вторые производные относительно соответствующих осей;

$A, B, C, A_1, B_1, C_1, A_2, B_2, C_2$ — моменты инерции внешнего и промежуточного колец ГСП и самой платформы относительно соответствующих осей;

$P_1, Q_1, R_1, P_2, Q_2, R_2, P_3, Q_3, R_3, J_0, J$ — моменты инерции кожухов и гироскопов $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$;

$K_{\alpha_1}, K_{\alpha_2}, K_{\alpha_3}, K_{\beta_1}, K_{\beta_2}, K_{\beta_3}$ — коэффициенты вязкого трения в соответствующих осях;

m — масса; L, S — линейные отстояния центров тяжести гироскопов G_1, G_2, G_3 от центра тяжести ГСП;

$M_x, M_y, M_z, M_{y_1}, M_{z_1}, M_{z_2}$ — управляющие и возмущающие моменты в соответствующих осях.

Идентификаторы на рис. 4.8 соответствуют приведенным обозначениям.

ГЛАВА 5

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

§ 5.1. Методы моделирования и их применение в САПР

Под моделированием какого-либо объекта (явления, системы, устройства, знакового образования) обычно понимается восприятие и исследование другого объекта, подобного оригиналу в форме, удобной для исследования, и перенос полученных сведений на моделируемый объект. При этом объекты считаются подобными, если характеристики процессов, происходящих в каком-либо из них, отличаются от соответствующих характеристик другого объекта вполне определенными и постоянными в течение данного процесса коэффициентами. Модель изучаемого явления (объекта) при этом может быть иной физической природы, отлича-

ной от природы оригинала. Это обстоятельство открывает широкие возможности для применения моделирования в проектировании, обусловленные привлечением таких эффективных его средств, как ЭВМ, динамические стенды, различного рода имитаторы и тренажеры.

Существуют различные методы моделирования: геометрическое и физическое моделирование, моделирование путем прямых аналогий, математическое моделирование на аналоговых и цифровых вычислительных машинах (АВМ и ЦВМ), полунатурное моделирование.

Каждый из этих методов имеет свои достоинства и недостатки. Применение того или иного метода определяется в каждом конкретном случае в зависимости от исследуемой системы и условий ее работы. При этом необходимо иметь набор правил и условий, выполнение которых обеспечивает требуемую точность изучения заданного объекта по его модели. Эти правила и условия формулируются в теории подобия*.

На основе анализа перечисленных методов моделирования в соответствии с требованиями, предъявляемыми к «инструментам САПР» (см. § 1.1), в состав САПР САУ вводятся моделирование на ЭВМ (АВМ и ЦВМ) и полунатурное моделирование. В последнем случае с помощью средств САПР осуществляется не только воспроизведение и исследование объекта, но и управление процессами полунатурного моделирования (применение полунатурного моделирования в составе САПР для проектирования САУ рассматривается в гл. 10).

При математическом моделировании, моделировании на ЭВМ, в качестве объекта моделирования, оригинала, выступают исходные уравнения, представляющие ММ объекта, в качестве модели — процессы, протекающие в соответствии с этими уравнениями и воспроизводимые на ЭВМ в виде «машинных решений» либо аппаратно (АВМ), либо путем реализации программ (ЦВМ).

Математическое моделирование САУ осуществляется на АВМ и ЦВМ, поэтому часто такие способы называют *аналоговым* и *цифровым моделированием*. АВМ применяются в САПР САУ как консольные, терминальные, устройства на рабочих местах разработчиков и испытателей. Управление АВМ осуществляется через терминальные станции центральным процессором в соответствии с общей идеологией построения САПР САУ (см. § 2.1). В дальнейшем будем применять термин ЭВМ, понимая под ним только ЦВМ — основу технических средств САПР.

В математическом моделировании выделяют *имитационное моделирование*, под которым понимается воспроизведение процессов, объектов, явлений с имитацией случайными величинами и случайными процессами звеньев оригинала, которые не удается

представить определенными ММ. Имитационное моделирование рассматривают так же, как управляемый эксперимент*, производимый на ЭВМ. В таком эксперименте определенные математическими моделями части объекта моделирования взаимодействуют с имитирующими возмущающие воздействия и некоторые звенья САУ генераторами случайных величин. Это взаимодействие проводится по определенным в эксперименте правилам, а результаты моделирования подвергаются статистической обработке. Так, при моделировании ЛА по полной ММ, представленной на рис. 4.5, воздействие на него со стороны других внешних факторов мирового пространства — атмосферы, звезд, полярного сияния, космической пыли имитируется генераторами случайных величин и процессов, а обработка результатов моделирования проводится на ЭВМ по специальной программе (см. гл. 6).

Под *полунатурным моделированием* (моделированием с реальной аппаратурой) понимают исследование элементов реальной аппаратуры совместно с моделью остальной части системы, реализованной на ЭВМ.

Применение такого метода моделирования становится необходимым в тех случаях, когда не удастся описать работу некоторых элементов системы математически.

При полунатурном моделировании систем управления подвижных объектов возникает необходимость моделирования в натуральном масштабе времени движения устройств САУ с целью влияния их кинематики и динамики на работу САУ в целом, причем ряд элементов этой САУ не поддается математическому описанию и реализуется аппаратно.

Пример 5.1. Моделирование радиолокационных (РЛ) САУ летательных аппаратов в условиях помех.

При исследовании таких САУ процесс передачи и приема антенной отраженного сигнала трудно поддается математическому описанию, поэтому приходится РЛ и другую аппаратуру, не поддающуюся математическому описанию, воспроизводить в «натуре», а остальные звенья САУ — «математически» на ЭВМ. Естественно, работа всей замкнутой схемы моделирования должна проводиться в натуральном масштабе времени.

На рис. 5.1, а показана схема полунатурного моделирования такой системы. Моделирование системы управления, проводимое в соответствии со схемой рис. 5.1, позволяет анализировать как всю систему в целом, так и отдельные ее элементы, несмотря на то что математическое описание участка первого контура управления отсутствует.

В этой главе излагается математическое моделирование как один из инструментов САПР. Этот инструмент включает в себя соответствующие компоненты основных обеспечений САПР и служит для воспроизведения и исследования САУ и их устройств на ЭВМ с целью эффективной замены макетирования на всех эта-

* Венников В. А. Теория подобия и моделирования. М, 1979.

* Соловьев В. В. Проблема автоматизации проектирования и методы теории автоматического управления // Изв. АН СССР. Серия ТК. 1980. № 5. С. 23 — 30.

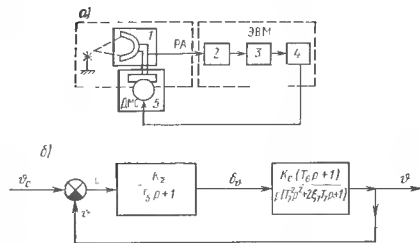


Рис 5.1. Структурные схемы:

а — модулятурного моделирования радиолокационной САУ, б — САУ самолета; 1 — РЛ антенна; 2 — приемник; 3 — система навигации; 4 — объект управления с автоматизмом; б — динамический моделирующий стенд, который воспроизводит угловое движение с установленной на нем реальной аппаратурой (РА)

пах проектирования САУ. Так, математическое моделирование динамики САУ позволяет значительно уменьшить объемы макетных испытаний и осуществить:

решение таких проектных задач, как анализ функционирования САУ, их устройств и элементов; исследование влияния изменения параметров и возмущающих воздействий на стабильность характеристик САУ, выбор структурной схемы САУ по задаваемым проектировщиком критериям; оценки устойчивости, динамических и статических ошибок для различных значений параметров выбранной структурной схемы и возмущающих воздействий.

Основное преобразование к подсистеме моделирования САПР САУ — создание более эффективного по отношению к макетированию инструмента для решения перечисленных проектных задач.

§ 5.2. Приведение математических моделей САУ к виду, удобному для моделирования

Приведение к виду, удобному для моделирования, одинаково необходимо как при моделировании на АБМ, так и при моделировании на ЦВМ, поскольку непосредственная реализация исходных ММ САУ оказывается практически невозможной из-за несоответствия этих ММ средствам их воспроизведения на ЭВМ (существующие численные методы интегрирования, соответствующие лингвистические и программные компоненты, возможность самих

ЭВМ). Такое несоответствие устраняется путем понижения порядка исходных уравнений, замены переменных и других эквивалентных преобразований с целью исключения неустойчивых звеньев, операций дифференцирования, «не реализуемых» на ЭВМ неллинейных звеньев.

Средствами подсистемы САПР САУ «Упрощение и преобразование ММ» (см. § 4.3) удается в значительной степени автоматизировать преобразования ММ. В дополнение к этим средствам рассмотрим здесь ряд типичных методов и алгоритмов приведения исходных ММ САУ к виду, удобному для моделирования.

В том случае, когда исходная ММ соответствует верхнему уровню представления САУ и задана в виде структурной схемы или графа (см. § 4.1, рис. 4.1), ввиду того что численные методы моделирования на ЭВМ разработаны, как правило, для форм ММ (3.10), (3.15), возникает необходимость преобразования структурных и графовых ММ к этим формам. Наиболее удобной формой ММ, широко применяемой при математическом моделировании, является форма Коши (3.10). Последовательность операций соответствующего алгоритма продемонстрируем на примере.

Пример 5.2. Приведение к форме Коши ММ, заданной участком структурной схемы САУ ЛА по тангажу (рис. 5.1, б)

Следуя принятой на структурной схеме (рис. 5.1, б) последовательности звеньев, запишем уравнения операторов в нормальной форме: для первого звена

$$\ddot{\delta}_0 = \frac{K_2}{T_2} (\delta_0 - \delta) - \frac{1}{T_2} \dot{\delta}_0;$$

для второго звена

$$\ddot{\delta} = v_1, \quad \dot{v}_1 = v_2.$$

$$\ddot{v}_2 = -\frac{1}{T_2^2} \left[-2\xi_1 T_2 v_2 - v_1 + K_c T_6 + K_c T_6^2 \left(\frac{K_2}{T_2} (\delta_0 - \delta) - \frac{1}{T_2} \dot{\delta}_0 \right) + K_c \dot{\delta}_0 \right].$$

Перепишем эти уравнения в матричной форме (3.15), получим

$$\dot{Y} = AY + BX, \quad Y = (\delta, v_1, v_2, \delta_0), \quad X = (0, 0, 0, \delta_0).$$

где

$$B = \begin{pmatrix} 0, & \frac{K_c T_6 K_2}{T_2 T_2^2}, & \frac{K_2}{T_2} \end{pmatrix}.$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{K_c K_2 T_6}{T_2 T_2^2} & -1/T_2^2 & -\frac{2\xi_1}{T_2} & -\frac{K_c T_6}{T_2 T_2^2} + \frac{K_c}{T_2^2} \\ -\frac{K_2}{T_2} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_2} \end{pmatrix};$$

ММ в форме графов приводятся к форме Коши аналогично, только преобразованиям подвергаются операторы дуг графа.

Рассмотрим способы приведения к форме Коши (3.10), (3.11) обобщенных стохастических уравнений (3.7) и форм (3.8), (3.12)—(3.14). Начнем с общей формы (3.7). Прямой ввод в ЦВМ случайных процессов $X(t)$ при большой размерности вектора X приводит к быстрому заполнению памяти ЦВМ и снижению ее быстродействия. Значительные затруднения также вызываются случайным характером вектора начальных условий Y_0 и вектора параметров λ , которые приходится задавать раздельно.

В процессе приведения (3.7) к виду, удобному для моделирования, стремятся избавиться от этих недостатков.

Для придания однородности исходной форме (3.7) введем начальные условия Y_0 , $\dot{Y}_0$ в число параметров λ с помощью замены $Y = Z + Y_0$, $\dot{Y} = \dot{Z} + \dot{Y}_0$. Тогда вместо (3.7) получим

$$F(\ddot{Z}, \dot{Z}, Z, U, A, Y_0, \dot{Y}_0, X, t) = 0, \quad Z(0) = \dot{Z}(0) = 0. \quad (5.1)$$

Введем новый вектор параметров γ большей размерности

$$\gamma = (\alpha_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n_k}, y_{01}, y_{02}, \dots, y_{0n_1}) = (\gamma_1, \dots, \gamma_{n_k+2n_1}),$$

тогда вместо (5.1) можем записать

$$F(\ddot{Z}, \dot{Z}, Z, U, \gamma, X, t) = 0. \quad (5.2)$$

Учитывая, что каждая составляющая вектора $X(t)$ задается ансамблем своих реализаций

$$x_i(t) = x_{i1}(t), x_{i2}(t), \dots, x_{iN}(t),$$

$i = \overline{1, n_2}$, где N — номер эксперимента, случайную функцию $x_i(t)$ можно рассматривать как функцию двух переменных $x_i(t, N)$. На ЭВМ функцию $x_i(t, N)$ воспроизводят с помощью программ — генераторов случайных величин — либо с помощью генераторов реализаций случайных функций.

Оба указанных способа применяются при моделировании на АВМ. При моделировании на ЦВМ предпочитают первый способ. Но для реализации этого способа требуется приведение случайных функций к случайным величинам. В настоящее время разработаны способы представления случайных функций как детерминированных зависимостей от случайных величин. При этом следует стремиться к получению возможно меньшего количества случайных величин с целью экономии ресурсов ЦВМ.

Случайный процесс $x_i(t)$ представляется в виде

$$x_i(t) \cong m_i(t) + \sum_{k=1}^n V_k \varphi_k(t), \quad (5.3)$$

где $m_i(t)$ — математическое ожидание; V_k — независимые случай-

ные величины; φ_k — детерминированные функции, обычно ортогональные на отрезке $0 < t \leq T$ (например, функции в ряде Фурье).

Однако представление (5.3) требует весьма большого числа величин V_k и, следовательно, генераторов этих величин. Поэтому вместо линейного разложения (5.3) используется нелинейное

$$x_i(t) \cong m_i(t) + \varphi_i(t, V_1, V_2, \dots, V_n) \quad (5.4)$$

с конкретной реализацией функций φ в виде

$$\varphi = V_1 \sin \omega t + V_2 \cos \omega t. \quad (5.5)$$

Тогда после известных преобразований найдем

$$x_i(t) \cong m_i(t) + A_i \sin(\omega_i t + \xi_i), \quad i = \overline{1, n_2}, \quad (5.6)$$

где A , ω , ξ — случайные величины, а уравнение (5.2) перепишем в виде

$$F(\ddot{Z}, \dot{Z}, Z, U, p, t) = 0, \quad (5.7)$$

где

$$p = (\gamma_1, \dots, \gamma_{n_k+2n_1}, A_1, A_2, \dots, A_{n_2}, \quad (5.8)$$

$$\omega_1, \dots, \omega_{n_2}, \varphi_1, \dots, \varphi_{n_2} = (p_1, \dots, p_{n_k+2n_1+3n_2}).$$

ММ (5.7) уже достаточно удобна для реализации на ЭВМ с помощью генераторов случайных величин, однако перед последующими этапами ее реализации на ЭВМ необходимо осуществить приведение к форме Коши (3.10). Для упрощения такого приведения будем считать, что (5.7) — детерминированная система дифференциальных уравнений, и поскольку векторы U и p в дальнейшем не влияют на преобразования, (5.7) перепишем в виде

$$F(\ddot{Z}, \dot{Z}, Z, t) = 0. \quad (5.9)$$

Если уравнение (5.9) разрешено относительно $\ddot{Z}$, то приведение в форме Коши выполняется средствами подсистемы «Построение ММ» и сводится к алгоритму

$$\ddot{Z} = F_1(\dot{Z}, Z, t) \Rightarrow \begin{cases} \dot{Z}_1 = Z_2, \\ \dot{Z}_2 = F_1(Z_2, Z_1, t), Z_1 = Z. \end{cases} \quad (5.10)$$

Уравнения в форме (5.10) удобны при математическом моделировании, так как в большинстве случаев именно для этой формы составляются соответствующие стандартные программы численного интегрирования.

В том случае, когда уравнение (5.9) не разрешено относительно старшей производной, вместо (5.10) получим

$$\begin{cases} \dot{Z}_1 = Z_2; \\ \dot{Z}_2 = F_2(\ddot{Z}_2, Z_2, Z_1, t), \text{ где } F_2(\dots) = F + \ddot{Z}_2. \end{cases} \quad (5.11)$$

Приведение этого уравнения к форме Коши в общем случае — весьма сложная задача. Один из подходов в решении этой задачи состоит в следующем. Для разрешения последнего уравнения системы (5.11) относительно $\dot{z}_2$ воспользуемся формулой Ньютона по отношению к $\dot{z}_2$. Положим $F_2(\dot{z}_2, z_2, z_1, t) = F_2(\dot{z}_2)$. Тогда

$$\dot{z}_2^{(k+1)} - \dot{z}_2^{(k)} = \left(\frac{\partial F_2(\dot{z}_2)}{\partial \dot{z}_2} \right)^{-1} \cdot F_2(\dot{z}_2^{(k)}),$$

где $k = \overline{0, N}$ — число итераций, или

$$\dot{z}_2^{(k+1)} = \dot{z}_2^{(k)} + \left(\frac{\partial F_2}{\partial \dot{z}_2} \right)^{-1} \cdot F_2(\dot{z}_2^{(k)}, z_2^{(k)}, z_1^{(k)}, t). \quad (5.12)$$

Заменяя последнее уравнение системы (5.11) на уравнение (5.12), получим систему в «псевдорме» Коши:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{z}_1 - z_2 \\ \dot{z}_2^{(k+1)} - \dot{z}_2^{(k)} + \left(\frac{\partial F_2}{\partial \dot{z}_2} \right)^{-1} \cdot F_2(\dot{z}_2^{(k)}, z_2^{(k)}, z_1^{(k)}, t) \end{array} \right\} \quad (5.13)$$

Процесс решения системы (5.13) складывается из численного интегрирования системы (5.13) и итерационной последовательности для последнего алгебраического уравнения на каждом шаге.

Определенные приемы необходимы для приведения уравнений (3.12) — (3.14) к виду, удобному для моделирования на ЦВМ. Приведение к форме Коши уравнений (3.13), (3.14) в том случае, когда правая часть содержит только функцию возмущений $X(t)$, осуществляется просто. Трудности возникают при наличии в правой части (3.13), (3.14) производных от $X(t)$, как, например, для широко распространенного скалярного уравнения вида

$$a_0(t)y^{(n)} + a_2(t)y^{(n-1)} + \dots + a_n(t)y = b_0(t)x^{(n)} + \dots + b_n(t)x, \quad (5.14)$$

где $b_0(t)$, $b_1(t)$, ..., $b_n(t)$ — коэффициенты, аналогичные $a_0(t)$, $a_1(t)$, ..., $a_n(t)$. Рассмотрим приведение к форме Коши такого уравнения, ограничиваясь здесь дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами. Приведение в этом случае осуществляется с помощью последовательной замены переменных. Введем новые переменные $u_1, u_2, \dots, u_n$ по формулам

$$\begin{aligned} a_0 y - b_0 x &= u_1, \\ a_1 y - b_1 x + \dot{u}_1 &= u_2, \\ a_2 y - b_2 x + \dot{u}_2 &= u_3, \\ &\dots \dots \dots \\ a_n y - b_n x + \dot{u}_n &= 0. \end{aligned} \quad (5.15)$$

Тогда

$$\begin{aligned} \dot{u}_1 - u_2 - \frac{1}{a_0} a_1 u_1 - \frac{1}{a_0} (a_1 b_0 - b_1 a_0) x, \\ \dot{u}_2 - u_3 - \frac{1}{a_0} a_2 u_2 - \frac{1}{a_0} (a_2 b_0 - b_2 a_0) x, \\ \dots \dots \dots \\ \dot{u}_n - \frac{1}{a_0} a_n u_n - \frac{1}{a_0} (a_n b_0 - b_n a_0) x. \end{aligned} \quad (5.16)$$

Перепишывая (5.16) в матричной форме $\dot{U} = AU + BX$, для матриц A и B получим выражения

$$A = \frac{1}{a_0} \begin{pmatrix} a_1 & a_0 & 0 & \dots & 0 \\ -u_3 & 0 & a_0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -a_n & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \frac{1}{a_0} \begin{pmatrix} a_1 b_0 & -b_1 a_0 & 0 & \dots & 0 \\ a_2 b_0 & -b_2 a_0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_n b_0 & -b_n a_0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}. \quad (5.17)$$

Рассмотрим теперь приведение к форме Коши линейных дифференциальных уравнений в форме (3.16):

$$L(p)Y(t) = G(p)U(t) + R(p)X(t). \quad (5.18)$$

В (5.18) матрицы можно представить в виде

$$\begin{aligned} L(p) &= p^q L_0 + p^{q-1} L_1 + \dots + L_q, \\ G(p) &= p^r G_0 + p^r {}^1 G_1 + \dots + G_q, \\ R(p) &= p^s R_0 + p^s {}^1 R_1 + \dots + R_q, \end{aligned} \quad (5.19)$$

где $q \geq r, s$ — порядки производных. Из (5.19) следует порядок действий приведения в форме Коши:

$$\begin{aligned} L_0 Y^q + L_1 Y^{q-1} + L_2 Y^{q-2} + \dots + L_q Y = \\ = G_0 U^r + G_1 U^{r-1} + \dots + G_r U + R_0 X^s + R_1 X^{s-1} + \dots + R_s X. \end{aligned} \quad (5.20)$$

Разрешая это уравнение относительно старшей производной, найдем

$$Y^q = L_0^{-1} \{ -L_1 Y^{q-1} - \dots - L_s X \}. \quad (5.21)$$

Уравнение (5.21) имеет вид одиночного скалярного уравнения, поэтому с ним поступим аналогично скалярному случаю. Введем обозначения:

$$\begin{aligned} Y &= Z_1, \text{ где } Z_1 = (y_1, y_2, \dots, y_n), \\ \dot{Z}_1 &= Z_2, \text{ где } Z_2 = (\dot{y}_1, \dot{y}_2, \dots, \dot{y}_n), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \dots\dots\dots \\ & Z_q - L_0^{-1} L_1 Z_q - L_1^{-1} L_2 Z_{q-1} - \dots - L_{q-1}^{-1} L_q Z_1 + \\ & + L_0^{-1} [G(p)U + R(p)X] - L_0^{-1} L_1 Z_q - \dots - L_{q-1}^{-1} L_q Z_1 + \Phi(t), \end{aligned} \quad (5.22)$$

где

$$\Phi(t) = L_0^{-1} [G(p)U(t) + R(p)X(t)].$$

Тогда (5.22) в обобщенной форме будет иметь вид

$$\dot{Z} = AZ + \Phi(t), \quad (5.23)$$

где

$$A = \begin{pmatrix} 0 & E & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & E & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -L_0^{-1} L_1 & -L_1^{-1} L_2 & \dots & -L_{q-1}^{-1} L_q & -1 \end{pmatrix},$$

$$\Phi(t) = \begin{pmatrix} \Phi_1 \\ \dots \\ \Phi_q \end{pmatrix}, \quad E = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}.$$

В том случае, когда требуется исключить производные от правых частей в (5.21), строим алгоритмы аналогичный (5.16), вводя новые переменные.

§ 5.3. Численные методы и алгоритмы моделирования

Поскольку мы строим процессы моделирования на основе решения задачи Коши, будем исходить из уравнения (3.10), перепишав его здесь для простоты в виде

$$\dot{Y} = F(Y, t), \quad Y(0) = Y_0. \quad (5.24)$$

Далее достаточно будет рассмотреть скалярное уравнение

$$\dot{y} = f(y, t). \quad (5.25)$$

Численным решением уравнения (5.25) является таблица, которая на каждом шаге h даст числовые значения переменной $y(k, h)$ достаточно близкие к истинным значениям $y(k, h)$.

Классические методы численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений восходят к Л. Эйлеру (русский математик и механик, 1707—1783), Д. Адамсу (английский математик, 1812—1892), К. Рунге (немецкий математик, 1856—1927), А. Н. Крылову (математик и инженер, член АН СССР, 1863—1945). Появление ЦВМ и бурное их развитие для решения широкого круга задач науки и техники потребовало переоценки классических методов численного интегрирования, их машинной ориентации и разработки новых, собственно машинных методов, учитывающих специфику ЦВМ. Машинная ориентация классических численных методов состоит в распространении этих методов на системы уравнений большой размерности, автоматизации операций реализации методов на ЭВМ, выбору наиболее подходящих методов и алгоритмов для решения конкретной задачи и величины шага h в этих алгоритмах.

Численные методы, основанные на классическом разложении правых частей (5.25) в степенные ряды Тейлора в аналитической форме, обычно исключаются из практического применения ввиду необходимости вычислений производных функций $f(y, t)$ порядка $n > 1$. Однако применение ППН «Аналитические преобразования» (см. § 4.2) позволяет для ряда ММ САУ «заготавливать» эти производные в аналитическом виде, что принципиально меняет возможности применения численных методов на степенных разложениях, делает их эффективными. В соответствии с отмеченными обстоятельствами рассмотрим построение таких методов. Будем искать решения (5.25) в форме ряда

$$y = \sum_{k=1}^{\infty} a_k t^k + a_0, \quad a_0 = y_0. \quad (5.26)$$

сходящегося на промежутке $0 \leq t \leq R$. Тогда все дело сводится к нахождению неопределенных коэффициентов a_k , $k \in [0, \infty]$, в (5.26). Для этого подставим в (5.25), предварительно разложив $f(y, t)$ в ряд Тейлора относительно точки $t=0$, $y=y_0$:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n k a_k t^{k-1} &= f(0, y_0) + \frac{\partial f}{\partial t} t + \frac{\partial f}{\partial y} (y - y_0) + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} t^2 + \\ &+ \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} (y - y_0)^2 + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial t} (y - y_0) t + \dots \end{aligned}$$

Приравняв в этом разложении коэффициенты при одинаковых степенях t , найдем

$$a_0 = y_0,$$

$$a_1 = f(0, y_0),$$

$$a_2 = \frac{1}{2!} \left(\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial y} a_1 \right) \Big|_{t_0, y_0}, \quad (5.27)$$

$$a_3 = \frac{1}{3!} \left(\frac{1}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} + \frac{\partial f}{\partial y} a_2 + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} a_1 + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial t} a_1 \right) \Big|_{t_0, y_0}.$$

Таким образом, можно последовательно найти a_k и тем самым построить решение (5.26).

Однако этот алгоритм обладает существенными недостатками: необходимостью ограничиваться только промежуток сходимости ряда (5.26), оперировать с большим числом членов этого ряда и брать производные высокого порядка от правой части в (5.25). От первого недостатка мало избавиться воспользовавшись аналитическим продолжением решения $y(t)$

$$y = \sum_{k=1}^{\infty} a_k (t - t_j)^k + y_0,$$

где t_j — переменный центр разложения, а $(t - t_j) < R$, $j = 0, 1, 2, \dots$, $t_0 = 0$ (рис. 5.2, а).

В этом случае коэффициенты разложения a_k каждый раз пересчитываются для нового центра разложения t_j, y_j .

От второго недостатка избавляются применением асимптотического представления $y(t)$:

$$\left| y(t) - \sum_{k=1}^n a_k (t - t_j)^k \right| < \epsilon.$$

Для асимптотического представления $y(t)$ удобно воспользоваться формулой Тейлора в точке $t - t_j$:

$$y(t) = y(t_j) + \sum_{i=1}^n y^{(i)}(t_j) \frac{(t - t_j)^i}{i!} + O[(t - t_j)^{n+1}], \quad (5.28)$$

где $O[(t - t_j)^{n+1}]$ — остаточный член, представляющий малую величину выше n -го порядка; $y^{(i)}(t_j)$ — i -я производная от $y(t)$ в t_j .

В теории рядов Тейлора доказано, что если для какой-либо функции $\varphi(t)$, имеющей производные до n -го порядка включительно, в точке t выполняется условие

$$\varphi(h) - \ddot{\varphi}(h) - \ddot{\varphi}(h) - \dots - \varphi^{(n)}(h) \rightarrow 0, \quad (5.29)$$

то $\varphi(t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow h$ и представляет собой бесконечно малую порядка малости выше n . Тогда, обозначив в (5.28)

$$\varphi^{(i)}(h) = y - y_j - \sum_{i=1}^n \frac{y^{(i)}(t_j)}{i!} h^i$$

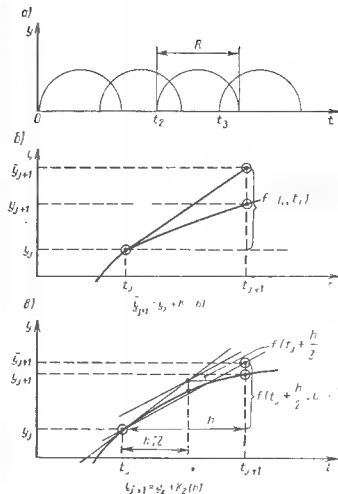


Рис. 5.2. Операции построения численных методов Рунге—Кутты

и обеспечив выполнение условия (5.29) выбором n и h , получим

$$\epsilon = O(h^{n+1}) \leq y^{n+1}(h) \frac{h^{n+1}}{(n+1)!}, \quad \text{где } \theta < 1.$$

На промежутке $T \in (t_{j+1}, t_j)$ асимптотическое разложение $y(t)$ примет вид

$$\bar{y}(t_{j+1}) \cong \bar{y}(t_j) + \sum_{i=1}^n \bar{y}^{(i)}(t_j) \frac{h^i}{i!}. \quad (5.30)$$

В этом выражении есть два регулируемых параметра: n и h . Выбором этих параметров можно добиваться точности порядка h^{n+1} при числе членов разложения n . Имеющиеся в составе САПР

САУ средства программирования позволяют автоматически получать аналитические выражения для $y^{(n)}(t)$ в (5.30). Поэтому процедуру численного интегрирования уравнения (5.25) можно построить в соответствии с алгоритмом (5.27), возложив на ЭВМ определение производных, расчет коэффициентов a_i , выбор шага $h \leq R$. Распространение алгоритма (5.27), составленного для скалярного уравнения на систему уравнений (3.10), состоит в вычислении производных и в составлении в аналитическом виде коэффициентов для векторного уравнения

$$\bar{Y}_{j+1} = \bar{Y}_j + hF(\bar{Y}_j, t_j) + \frac{h^2}{2} \left(\frac{\partial F(\cdot)}{\partial Y} \right)_{Y_j, t_j} \bar{Y}_j + \frac{\partial F(\cdot)}{\partial t} \Big|_{Y_j, t_j} + \dots \quad (5.31)$$

где $\partial F/\partial t$ — вектор, полученный покомпонентным частным дифференцированием, а $\partial F/\partial Y$ есть $(n \times n)$ матрица Якоби функции $F(Y, t)$ системы (3.10), в которой для простоты положено $X = \lambda = U = 0$.

Построение численных методов, в которых переход от $\bar{y}(t_j)$ к $\bar{y}(t_{j+1})$ не требовал бы вычисления производных от правых частей в (5.25), основано на идее Рунге. Принцип построения таких формул численного интегрирования можно усмотреть из геометрических построений (рис. 5.2, б, в). Продолжая этот процесс и организуя комбинации $k_i(h)$ для нескольких точек внутри промежутка $t_{j+1} - t_j$, запишем общую формулу этой группы численных методов:

$$\bar{y}_{j+1} = \bar{y}_j + \sum_{i=1}^n b_i K_i(h), \quad (5.32)$$

где $K_i(h) = hf[t_j + \alpha_i h, \bar{y}_j + \beta_{i1} K_1(h) + \beta_{i2} K_2(h) + \dots + \beta_{i, i-1} K_{i-1}(h)]$.

Из (5.32) при различных значениях a_i, β_i получим как частные случаи известные формулы численного интегрирования Рунге и Кутты (венгерский математик, 1867—1944) разного порядка точности:

первого порядка

$$\bar{y}_{j+1} = \bar{y}_j + K_1(h), \quad K_1(h) = hf(\bar{y}_j, t_j), \quad (5.33)$$

— метод Эйлера;

второго порядка

$$\bar{y}_{j+1} = \bar{y}_j + \frac{1}{2} [K_1(h) + K_2(h)], \quad K_2(h) = hf(\bar{y}_j + K_1(h), t_j + h) \quad (5.34)$$

— метод Эйлера — Коши;

$$\bar{y}_{j+1} = \bar{y}_j + K_2\left(\frac{h}{2}\right), \quad K_2\left(\frac{h}{2}\right) = hf\left(\bar{y}_j + \frac{1}{2} K_1(h), t_j + \frac{h}{2}\right) \quad (5.35)$$

— усовершенствованный метод Эйлера; четвертого порядка

$$\left. \begin{aligned} \bar{y}_{j+1} &= \bar{y}_j + \frac{1}{6} \left(K_1(h) + 2K_2\left(\frac{h}{2}\right) + 2K_3\left(\frac{h}{2}\right) + K_4(h) \right); \\ K_3\left(\frac{h}{2}\right) &= hf\left(\bar{y}_j + \frac{1}{2} K_2\left(\frac{h}{2}\right), t_j + \frac{h}{2}\right); \\ K_4(h) &= hf\left(\bar{y}_j + K_3\left(\frac{h}{2}\right), t_j + h\right). \end{aligned} \right\} \quad (5.36)$$

Точность представления y на одном шаге в каждой формуле оценивается остаточным членом разложения функции $\phi(h)$ в ряд Тейлора:

$$O(\phi(t)) = \frac{\phi^{r+1}(th)}{(r+1)!} h^{r+1}. \quad (5.37)$$

Величина r в (5.37) называется порядком точности метода или степенью метода. Важно сразу же отметить, что выбор шага h исходя из заданной точности на одном шаге в принципе не гарантирует требуемой точности конечного результата.

Следующая группа методов численного интегрирования, основанная на идеях Адамса, строится на основе аппроксимации подынтегральной функции в формуле Ньютона — Лейбница

$$y_{j+1} = y_j + \int_{t_j}^{t_{j+1}} \bar{y}(t) dt \quad (5.38)$$

известным полиномом. Эта формула получена после интегрирования уравнения (5.25) на промежутке t_j, t_{j+1} . Если в качестве такого полинома выбирать полином Ньютона, то $\bar{y}(t)$ можно представить в виде

$$\bar{y}(t) = a_0 + a_1(t - t_j) + a_2(t - t_j)(t - t_{j-1}) + \dots \quad (5.39)$$

Задавая предыдущие значения $\bar{y}(t_j), \bar{y}(t_{j-1}), \bar{y}(t_{j-2}), \dots$ в предположении, что они вычислены заранее, вычисляем неизвестные коэффициенты:

$$a_0 = \bar{y}(t_j), \quad a_1 = \frac{\bar{y}(t_{j-1}) - \bar{y}(t_j)}{h}, \dots, \quad (5.40)$$

где $h = [t_j - t_{j-1}]$. Подставляя (5.40) в (5.38), после интегрирования получим

$$\begin{aligned} \bar{y}(t_{j+1}) &= \bar{y}(t_j) + h\bar{y}(t_j) + \frac{[\bar{y}(t_{j-1}) - \bar{y}(t_j)]h}{2} + \\ &+ \frac{[\bar{y}(t_{j-2}) - 2\bar{y}(t_{j-1}) + \bar{y}(t_j)]5h}{12} + \dots, \end{aligned}$$

или в общем виде

$$\bar{y}(t_{j+1}) - \bar{y}(t_j) + h \sum_{i=0}^n b_i \bar{y}(t_{j-i}) + 0(h^{l+1}) + \dots \quad (5.41)$$

Методы типа (5.41) называют также многшаговыми в отличие от одношаговых (5.32), так как для получения y_{j+1} необходимо предварительно вычислить n предыдущих значений $\bar{y}_{j-k}$, $k=0, n$. Очевидно, недостатком методов этого типа является необходимость предварительного вычисления «разгонных» значений $\bar{y}(t_{j-i})$. Методы (5.32), (5.41) реализованы в виде стандартного программного обеспечения современных ЭВМ.

Применимость методов (5.32), (5.41) к моделированию САУ тесно связана с выбором шага h в формулах численного интегрирования. В случае одного уравнения (5.25) значение h выбирается из соображений точности на одном шаге и оно же обеспечивает устойчивость вычислительного процесса. Когда же рассматривается система уравнений (3.10), то именно устойчивость разностных уравнений (5.32), (5.41) ограничивает шаг. Наибольшие шаги, обеспечивающие устойчивость разностной схемы, или, как их обычно называют, критические шаги, различаются по величине для разных методов. Так, например, если собственные значения вычисленной в данной точке $t=t^*$ матрицы Якоби системы (3.10) вещественны, то критический шаг выбирается из соотношения

$$h \leq \frac{r}{|\lambda_{\max}|}, \quad (5.42)$$

где $\lambda_{\max}$ — максимальное собственное значение; r — число, зависящее от метода. Для метода Рунге — Кутты четвертой степени оно равно 2.78, для методов Эйлера и Эйлера — Коши — 2, для метода Адамса четвертой степени — 0.3. Причем даже незначительное увеличение значения h против допустимого приводит к потере вычислительной устойчивости — «взрыву погрешности».

Пример 5.3. Задача определения реакции инерционного звена САУ на входное воздействие (рис. 5.3) при значениях параметров $\kappa(t) = e^{-t}$, $K=1$, $T=10^{-4}$ сводится к численному интегрированию дифференциального уравнения вида

$$\dot{y} = -10^4 y + e^{-t}, \quad y(0) = y_0, \quad 0 \leq t \leq t_n, \quad (5.43)$$

где $t_n = 1$ с.

Применив метод Эйлера (5.33), положим $h = t_n/n$, где n — число шагов. Тогда, переходя к разностному уравнению, соответствующему исходному (5.43), получим $y_{k+1} = y_k + h(-10^4 y_k + e^{-t_k})$, откуда

$$\text{при } k=0 \quad y_1 = y_0 + h(-10^4 y_0 + 1),$$

$$\text{» } k=1 \quad y_2 = y_1 + h(-10^4 y_1 + e^{-h}),$$

$$\dots \dots \dots \text{при } k=n \quad y_{n+1} = y_n + h(-10^4 y_n + e^{-nh}).$$

Подставляя последовательно предыдущее уравнение в последующее, получим

$$y_{n+1} - y_0 (1 - 10^4 h)^{n+1} + h \sum_{i=0}^n (1 - 10^4 h)^i e^{-(n-i)h}. \quad (5.44)$$

Решением уравнения (5.43), очевидно, является функция $y = y_0 e^{-10^4 t} + e^{-t}$. Условие вычислительной устойчивости метода (5.33) применительно к (5.44), очевидно, будет $|1 - 10^4 h| < 1$, откуда $h < 2 \cdot 10^{-4}$. Следовательно, надо сделать $n = 0.5 \cdot 10^4 = 5000$ шагов для воспроизведения элементарной функции $y(t) \sim e^{-t}$ на отрезке $[0, 1]$. Не сдвигая и нулевое начальное условие $y_0 = 0$ в (5.44), так как вынужденная составляющая в (5.44) также начинает неограниченно расти при $h > 2 \cdot 10^{-4}$. Таким образом, любая попытка увеличения шага приводит к «взрыву погрешности».

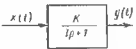


Рис. 5.3. Реакция инерционного звена на входное воздействие

Подобные явления возникают при численном решении задач Коши не только для САУ, но и для других объектов. Это обстоятельство повлияло на усиленное внимание к разработке специально машинных методов численного интегрирования, учитывающих особенности ЭВМ.

Одна из основных идей таких методов заключается в построении формул численного интегрирования с «обратной связью» — так называемых *неявных методов*. В неявных методах можно достичь увеличения шага h по сравнению с явными без потери устойчивости вычислительного процесса. В простейшем случае неявный метод получается из формулы (5.38), если воспользоваться *формулой правых прямоугольников* при взятии интегралов в (5.25):

$$\int_{t_j}^{t_{j+1}} \dot{y}(t) dt = \int_{t_j}^{t_{j+1}} f(y, t) dt, \quad (5.45)$$

$$y_{j+1} - y_j = h f(y_{j+1}, t_{j+1}).$$

Аналогично строятся неявные формулы для методов (5.32), (5.41). Например, неявная формула второго порядка будет иметь вид

$$\bar{y}_{j+1} - \bar{y}_j + \frac{1}{2} h [f(t_j, y_j) + f(t_{j+1}, \bar{y}_{j+1})], \quad (5.46)$$

а общая формула (5.41) изменится на

$$y_{j+1} - \bar{y}_j + h \sum_{i=0}^n b_i \bar{y}_{j+1-i} + 0(h^{l+1}). \quad (5.47)$$

Методы этого класса являются устойчивыми и не имеют ограниче-

сти может выбираться сообразно с требуемой длительностью ре-
шений вида (5.42) на величину шага дискретности. Шаг дискретно-
сти.

Пример 5.4. Применим неявный метод Эйлера для численного интегрирова-
ния уравнения (5.43), приведенного в предыдущем примере.

Применительно к уравнению (5.43) при $k=n$ получим

$$y_{n+1} = y_n + h(-10^4 y_{n+1} + e^{-h n}),$$

или

$$y_{n+1} = \frac{y_0}{(1 + h10^4)^{n+1}} + h \sum_{i=0}^n (1 + h10^4)^{-i} e^{-(n-i)h}. \quad (5.48)$$

В этом уравнении условие устойчивости вычислительного процесса $|1 + h10^4| > 1$ не накладывает никаких ограничений на выбор шага h . Однако точность пос-
произведения истинного решения уравнения (5.43) при *большом шаге* h оказы-
вается низкой, что легко проверить сопоставив первый член уравнения (5.48)
с функцией с 10^4 истинного решения уравнения (5.43).

При реализации неявных методов необходимо на каждом шаге
решать нелинейные уравнения типа (5.45), что вызывает значи-
тельные осложнения и является недостатком этих методов. Поэто-
му применение неявных методов сочетают со специальными мето-
дами решения нелинейных уравнений на каждом шаге.

Так, метод Эйлера (5.45) с модификацией его по формуле Нью-
тона примет вид

$$y_{j+1} = y_j + \left[1 - h \frac{\partial f}{\partial y}(y_j, t_{j+1}) \right]^{-1} [-hf(y_j, t_j)], \quad j = 1, \bar{n}.$$

Напомним, что формула Ньютона для решения уравнения
 $\varphi(y) = 0$ имеет вид

$$y_{k+1} = y_k - \left(\frac{d\varphi}{dy} \right)^{-1} \Big|_{y_k} \varphi(y_k).$$

Применительно к рассматриваемому случаю в этой формуле
следует положить

$$\begin{aligned} y_{k+1} &= y_{j+1}, \quad y_k = y_j; \\ \varphi(y_k) &= \varphi(y_{j+1}) - y_{j+1} - y_j - hf(y_{j+1}, t_{j+1}). \end{aligned}$$

Из других неявных методов приведем методы, предложен-
ные в 1952 г. американскими математиками С. Ф. Куртисом и
Н. О. Хиршфельдером, так как их применение оказалось эффек-
тивным при моделировании САУ. Неявные алгоритмы Куртиса —
Хиршфельдера строятся на принципе «дифференцирования назад»
и имеют вид [11]

$$\bar{y}_{j+1} = \bar{y}_{j-1} + h \dot{\bar{y}}_{j+1},$$

$$\bar{y}_{j+1} = \frac{4}{3} \dot{\bar{y}}_{j-1} - \frac{1}{3} \bar{y}_j + \frac{2}{3} h \dot{\bar{y}}_{j+1}, \quad (5.49)$$

$$\bar{y}_{j+1} = \frac{8}{11} \bar{y}_{j-1} - \frac{9}{11} \bar{y}_{j-2} + \frac{2}{11} \bar{y}_{j-3} + \frac{6}{11} h \dot{\bar{y}}_{j+1},$$

$$\bar{y}_{j+1} = \frac{48}{25} \bar{y}_{j-1} - \frac{36}{25} \bar{y}_j + \frac{16}{25} \bar{y}_{j-3} - \frac{3}{25} \bar{y}_4 + \frac{12}{25} h \dot{\bar{y}}_{j+1}.$$

Формулы (5.49) строятся на соответствующих аппроксимациях
производной $\dot{y}$ в (5.25) на j шаге:

$$\dot{\bar{y}}_{j+1} = \frac{d\bar{y}_{j+1}}{dt} = \frac{\bar{y}_{j+1} - \bar{y}_j}{h}; \quad \frac{d\bar{y}_{j+1}}{dt} = \frac{y_{j+1} - \frac{4}{3} \bar{y}_{j-1} - \frac{1}{3} \bar{y}_j}{2/3h}; \dots$$

т. е. в выполнении своеобразного «дифференцирования назад».

Применение неявных методов при моделировании САУ показы-
вает их преимущества над явными в смысле устойчивости вычис-
лительного процесса при увеличении шага, однако точность полу-
чения решений существенно зависит от точности решения нелиней-
ных алгебраических уравнений (5.45), (5.49). Причем если в яв-
ных методах выбор шаг по (5.44) удается получить, хотя и с
погрешностью, решение (5.25) качественно верное, то в неявных
при неправильном выборе шага можно получить устойчивые ре-
шения, но качественно отличные от искомого. Значительные уве-
личения шага при моделировании САУ неявными методами оказы-
ваются ограниченными из-за резкого снижения точности. Прак-
тически по сравнению с явными методами удается увеличить шаг
не более чем в 5–10 раз.

Эффективное применение неявные методы и алгоритмы нашли
в процедуре, предложенной Гиром, с изменениями и дополнениями,
внесенными Хиндмаршем (С. В. Гир и А. С. Хиндмарш — аме-
риканские математики). В процедуре Гира применяются методы
(5.49). Однако это не исключает возможности применения и дру-
гих численных методов. Неявный характер употребляемых в про-
цедуре Гира методов предполагает решение на каждом шаге систе-
мы алгебраических уравнений, для чего предусматривается ис-
пользование трех модификаций итерационного метода Ньютона.

Для этого каждое из уравнений (5.49) представляется в виде

$$\bar{y}_{j+1} = \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_i \bar{y}_{j-i} + h \sum_{i=0}^{K_2} \beta_i \bar{y}_{j+1-i}, \quad (5.50)$$

где α_i, β_i — числовые коэффициенты; K_1, K_2 — количество соответ-
ствующих слагаемых в (5.49).

Решение нелинейных алгебраических уравнений (5.50) относительно y_{j+1} строится как следующий процесс:

$$y_{j+1}^{(k)} - y_{j+1}^{(k-1)} - p \cdot \Phi(y_{j+1}^{(k)}),$$

где

$$\Phi(y_{j+1}^{(k)}) = y_{j+1}^{(k)} - h\beta_0 y_{j+1}^{(k)} - \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_i y_{j+1}^{(k)} - h \sum_{i=1}^{K_2} \beta_i y_{j+1}^{(k)}, \quad (5.51)$$

$$p = \frac{\partial \Phi}{\partial y_{j+1}} \Big|_{y_{j+1} = y_{j+1}^{(k)}} - 1 - h\beta_0 \frac{\partial f(y_{j+1}, t_{j+1})}{\partial y_{j+1}},$$

$y_{j+1}^{(k)}$ — k -е приближение к y_{j+1} в итерационном процессе:

$$k \in [1, N], \text{ а } f(y_{j+1}, t_{j+1}) = \dot{y}_{j+1}.$$

В случае системы уравнений (5.24) вместо скалярной величины p строится матрица P :

$$P = \frac{\partial F}{\partial y_{j+1}} \Big|_{y_{j+1} = y_{j+1}^{(k)}} - E - h\beta_0 \frac{\partial F(t_{j+1}, y_{j+1}^{(k)})}{\partial y_{j+1}^{(k)}}.$$

В процедуре Гира автоматически выбираются численный метод и шаг по заданной точности вычислений.

Если в некоторый момент времени используется метод степени l (например, в (5.51) $K_1 = l, K_2 = l - 1$), то одновременно оценивается локальная погрешность методов степени $l - 1, l \geq 1$. В дальнейшем применяется тот метод, который при заданной точности позволяет интегрировать с большим значением шага h .

Еще одно преимущество процедуры Гира в том, что она не требует стартового алгоритма. Интегрирование начинается с методов первой степени, а затем степень метода при необходимости изменяется в соответствии с задаваемой пользователем точностью. Следует отметить, что алгоритмы процедуры подвержены неустойчивости, которая проявляется в колебательном характере шага, принимающем до разумных значений, но неизменно малые. Возникающие трудности можно исключить уточняя соответствующие константы α_i, β_j эмпирическим путем.

Все рассмотренные методы являются скалярными, т. е. для каждого уравнения системы (3.10) составляется соответствующее разностное уравнение, поэтому они обладают присущими скалярным методам недостатками при применении их к системам большой размерности. Качественно новым является создание системных (матричных) методов, которые позволяют учитывать свойства правой части системы (3.10) и обеспечивают независимость выбора шага от устойчивости вычислительного процесса.

Системные методы были предложены Ю. В. Ракитским (советский инженер и математик, 1932—1986). Эти методы построены

на введении в разностное уравнение, эквивалентное исходному (3.10), матричного множителя $\Phi(A, H)$, который «подобен» шагу интегрирования h в методе Эйлера (5.33):

$$\bar{Y}_{k+1} = \bar{Y}_k + \Phi(A, H) F(t_k, Z_k). \quad (5.52)$$

Использование системных методов требует выбора матриц A и $\Phi(A, H)$. Матрицу Φ можно выбирать различными способами, но наиболее удобно в виде

$$\int_0^H e^{A\tau} d\tau,$$

где

$$\frac{\partial F(\bar{Y}, t)}{\partial \bar{Y}} = A$$

— матрица Якоби системы (3.10), вычисленная в момент времени t_i , соответствующий стационарным значениям $\bar{Y}(t)$:

$$A = \frac{\partial F(\bar{Y}, t)}{\partial \bar{Y}} \Big|_{t=t_i}, \quad \bar{Y} = \bar{Y}(t_i) \in \Pi_{t_i}. \quad (5.53)$$

Для быстрого вычисления матрицы $\Phi(A, H)$ целесообразно воспользоваться рекуррентным соотношением

$$\Phi_{v+1} = \Phi_v (2E + A\Phi_v), \quad \text{где } \Phi_v = \Phi\left(A, \frac{H}{v}\right), \quad v = 0, 1, \dots, N-1. \quad (5.54)$$

При моделировании САУ целесообразно выбрать Φ_0 в виде

$$\Phi_0 = h \left(E - \frac{Ah}{2} \right)^{-1}, \quad (5.55)$$

при этом H и h связаны соотношением $H = h \cdot 2^N$, где h — начальный шаг интегрирования, а точность вычислений Φ_0 соответствует точности метода (5.34) при интегрировании системы $\dot{Y} = AY$. На рис. 5.4, а приведена последовательность операций по реализации метода (5.52).

Верхняя граница для h удовлетворяет соотношению $h \leq \frac{1}{\|A\|}$, а достаточное по точности нижнее значение h определяется сравнением $\bar{Y}(h, k)$, $\bar{Y}(kh/r)$, вычисленных при h и h/r .

Рассмотрим теперь системные методы для решения систем линейных уравнений, получаемых из общего уравнения (3.10) после

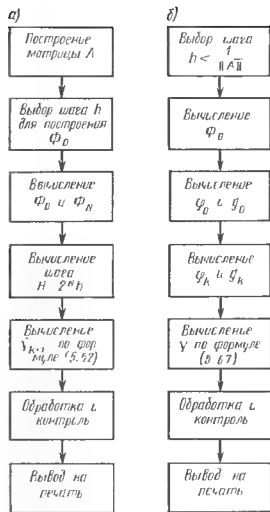


Рис. 5.4. Схема последовательности операций по реализации системных методов

$$Y(t) = \cos(V\bar{A}t) \dot{Y}_0 + (V\bar{A})^{-1} \sin(V\bar{A}t) \dot{Y}_0 + (V\bar{A})^{-1} \int_0^t \sin V\bar{A}(t-\tau) R(\tau) d\tau. \quad (5.61)$$

В формулах (5.59) — (5.61) функциональные матрицы определяются известными разложениями

$$e^{At} = E + At + \frac{A^2 t^2}{2!} + \frac{A^3 t^3}{3!} + \dots; \quad (5.62)$$

линеаризации:

$$\dot{Y} = A \cdot Y; \quad Y(0) = Y_0; \quad (5.56)$$

$$\dot{Y} = AY + X; \quad Y(0) = Y_0, \quad (5.57)$$

где $A = (a_{ij})^{n,n}$ — матрица из постоянных коэффициентов; X — n -вектор из постоянных составляющих.

Линейная система, характерная для ММ ряда объектов управления САУ, $AY + CY = R(t), Y(0) = Y_0,$

$$\dot{Y}(0) = \dot{Y}_0; \quad (5.58)$$

$C = (c_{ij})^{n,n}, B = (b_{ij})^{n,n}$ — матрицы из постоянных коэффициентов, а $R(t)$ — n -векторы возмущающих воздействий, заданных функций времени.

Для систем (5.56) — (5.58) можно записать в аналитическом виде точные векторно матричные формулы их решений. Формулы соответственно имеют вид

$$Y(t) = e^{At} \cdot Y_0; \quad (5.59)$$

$$Y(t) = e^{At} \cdot Y_0 + \int_0^t e^{A(t-\tau)} X d\tau; \quad (5.60)$$

$$\int_0^t e^{At} dt = Et + \frac{At^2}{2!} + \frac{A^2 t^3}{3!} + \dots; \quad (5.63)$$

$$\cos(V\bar{A}t) = E + \frac{A^2 t^2}{2!} + \frac{A^4 t^4}{4!} + \dots; \quad (5.64)$$

$$\sin(V\bar{A}t) = V\bar{A}t - V\bar{A} \cdot A \frac{t^3}{3!} + \dots, \quad (5.65)$$

е под $V\bar{A}$ понимается матрица, для которой $(V\bar{A})^2 = A$.

Формулы (5.59) — (5.65) определяют $Y(t)$ для любого момента времени. Казалось бы, задача решена и с точки зрения машинной реализации сведена к наиболее простой операции — «счету по формулам». Однако численная реализация этих формул упирается в серьезную проблему вычисления функциональных рядов (5.62) — (5.65). Непосредственное применение формул (5.62) — (5.65) для этой цели при достаточно больших t и плохой обусловленности матрицы A приводит к необходимости учета большого числа членов, увеличивающихся с ростом t , поэтому для организации вычислений от (5.56), (5.57) осуществляется переход к эквивалентным разностным уравнениям, по которым и осуществляется вычисление решения шаг за шагом. Такой переход уже был сделан для систем (3.15) (см. § 3.3, формула (3.26)).

Для систем (5.56), (5.57) эквивалентные разностные уравнения имеют вид

$$\bar{Y}(t+N) = e^{AN} Y(t); \quad (5.66)$$

$$\bar{Y}(t+N) = e^{AN} Y(t) + \int_0^N e^{A(N-\tau)} X d\tau. \quad (5.67)$$

где N — шаг дискретности, выбираемый из удобства наблюдения процесса $Y(t)$ и не зависящий от свойств этого процесса.

По существу, в (5.66), (5.67) все дело сводится к вычислению матриц e^{AN} и вектора

$$\int_0^N e^{A(N-\tau)} X d\tau.$$

Существует много способов вычисления матрицы e^{AN} , что указывает на сложность этой процедуры и зависимость ее от свойств матрицы A и величины N . При малых шагах h матрица e^{AN} вычисляется значительно проще. В практике численного интегрирования линейных уравнений, описывающих движение САУ, матрица e^{AN} вычислялась двумя способами: по формуле (5.62) при $t=h$; путем решения вспомогательного матричного уравнения $U =$

$=AU$, $U(0) = E$ с последовательным формированием e^{At} по столбцам

$$(e^{At})_1 = e^{At}U_1(0), (e^{At})_2 = e^{At}U_2(0), \dots, \\ (e^{At})_k = e^{At}U_k(0) \dots \quad (5.68)$$

где

$$U_k(0) = (0, 0, \dots, \underbrace{1}_{k}, \dots, 0)^T.$$

Для построения e^{At} и $\int_0^T e^{At} d\tau X$ Ю. В. Ракитским [11] предложена экономичная вычислительная процедура на основе рекуррентных формул

$$\varphi_{k+1} = \frac{2}{T_k}, \quad q_{k+1} = (E + \varphi_k) q_k, \quad (5.69)$$

где

$$\varphi_k = e^{\varphi_k A_k}, \quad q_k = \int_0^{2k} e^{At} d\tau X;$$

$$\varphi_0 = e^{At}, \quad q_0 = \Phi_0 X.$$

Матрица Φ_0 вычисляется по формуле (5.55). На рис. 5.4, б приведена последовательность операций по реализации алгоритма (5.69).

Выбор методов и алгоритмов численного интегрирования, подходящих для решения конкретной задачи (3.10) или (5.24), можно проверить исходя из свойств правых частей уравнений (5.24). Для моделирования САУ с числом обусловленности $\rho(Y) \ll 10^3$ и временем решения $t_n \leq 1$ мин вполне приемлемым оказываются скалярные методы (5.32), (5.49).

В случае моделирования САУ с числом обусловленности из ММ $\rho(Y) \leq 10^6$ и $t_n < 5$ мин вполне приемлемыми оказываются неявные методы (5.47), (5.41) с их реализацией в виде процедуры, аналогичной процедуре Гира (см. § 5.3).

Моделирование САУ с числом обусловленности $\rho(Y) > 10^6$ и временем наблюдения $t_n > 5$ мин скалярными методами становится малоэффективным, и необходимо применять системные методы (5.52), (5.60) - (5.69).

Практика моделирования САУ с помощью системных методов показывает, что эти методы позволяют существенно — в 20—30 раз — уменьшить время получения решения по сравнению со скалярными. Это дает возможность эффективно решать задачи моделирования САУ на ЭВМ по полным их моделям. Недостатком

системных методов (5.52) является необходимость вычисления матрицы $\Phi(A, H)$ в каждом частном случае и составления специальной программы пересчета шагов.

§ 5.4. Контроль и оценка точности моделирования

При исследовании САУ на ЭВМ неизбежны погрешности в машинных решениях из-за субъективных ошибок оператора, сбоев машины и т. п. В этой связи важное значение приобретает контроль машинных решений. Контроль машинных решений становится совершенно необходимым при моделировании САУ. Контроль и оценка точности моделирования в общем случае являются сложными задачами, далекими от завершения. Из существующих методов контроля отметим следующие:

Метод сравнения процессов. Этот метод предусматривает сравнение заранее рассчитанных по теоретическим формулам временных процессов с соответствующими машинными решениями, полученными на ЭВМ.

Метод сравнения амплитудно-фазовых частотных характеристик (АФЧХ). В этом случае сравниваются АФЧХ, снятые с модели, реализованной на ЭВМ, с соответствующими характеристиками, заранее построенными, рассчитанными или полученными из эксперимента на реальной аппаратуре.

Метод рассчитанных значений переменных. Для ряда моментов времени фиксируются значения переменных машинного решения и проверяется соответствие правых и левых частей заданных уравнений при подстановке в них найденных на ЭВМ числовых значений.

Оценивая эти и другие методы с точки зрения возможности быстро выявить качественное несоответствие машинного и искомого решения, возможности выявления источников погрешности, а также простоты метода, можно считать, что при моделировании линейных САУ наиболее практичными оказываются первые два метода.

Последовательность операции при таком контроле машинных решений такая:

а) структурная схема моделирования разбивается на замкнутые одномерные подсистемы, представляющие собой звенья 1-, 2-, и 3-го порядка, для которых имеются точные аналитические решения;

б) переходные функции указанных звеньев фиксируются на выходных устройствах;

в) машинные переходные процессы сравниваются с рассчитанными либо путем наложения соответствующих графиков, либо по основным характеристикам качества;

г) по результатам сравнения вносятся корректуры в модели;

д) АФЧХ снимаются с модели исследуемой полной системы и сравниваются с соответствующими характеристиками, заранее рас-

§ 5.5. Подсистема САПР САУ «Моделирование»

Инструмент разработчика САУ «Моделирование», так же как и предыдущий, состоит из семи компонентов.

Компоненты ТС в этом инструменте содержат АЦД для ввода исходной информации и АЦПУ, ГП для вывода результатов моделирования. Компоненты математического обеспечения изложены в § 5.2-5.4 и составляют методы и алгоритмы приведения к виду, удобному для моделирования, численного интегрирования, контроля и оценки точности машинных решений.

ПОЯ моделирования предназначен для ввода ММ САУ и их устройств, формулировки задачи и требований к результирующему проектному документу. ППП «Моделирование» включает в себя комплекс программных модулей, образующих соответствующее дерево, из которого они вызываются управляющей программой.

Информационный компонент представлен базой ММ САУ и их устройств и элементов. Методический и организационный компоненты инструмента состоят: из требований к оформлению проектных документов, отраслевых или государственных стандартов; форм ММ, поступающих на вход инструмента «Моделирование»; правил эксплуатации и обслуживания. Инструмент «Моделирование» применяется при выполнении проектных процедур на начальных этапах проектирования — моделировании прототипов проектируемой САУ, проверки на функционирование выбранной схемы, оценки влияния новых условий применения, — а также на всех остальных этапах по мере необходимости оценки влияния принятых решений на каждом «венте» проектирования (см. гл. 2).

Остановимся здесь подробнее на ПОЯ подсистемы «Моделирование», поскольку с позиции пользователя таким инструментом САПР САУ этот компонент является определяющим.

Проблемно-ориентированный язык (ПОЯ) «Моделирование», предназначенный для моделирования САУ*, построен применительно к ММ САУ, которые должны быть выведены с помощью подсистемы САПР «Построение ММ» или заданы в формах (3.10) — (3.27). Непрерывная часть динамической системы описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений (СДУ), а линейные звенья САУ — соответствующими передаточными функциями. Дискретная часть системы может описываться разностными уравнениями (РУ) или дискретными передаточными функциями. Нелинейные элементы могут быть заданы как в виде соответствующих аналитических зависимостей, так и типовыми звеньями, набор которых при необходимости может расширяться. Допускается задаче как детерминированных, так и случайных входных воздействий.

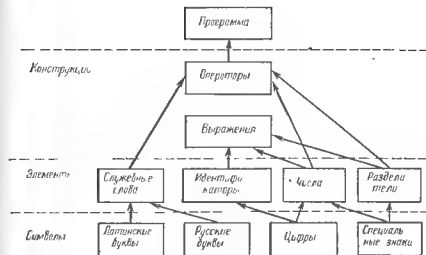


Рис. 5.6. Конструкции, элементы и символы ПОЯ «Моделирование»

В приводимой версии языка для численного интегрирования используется процедура Гира (5.50) (5.51). Многие параметры, необходимые для численного интегрирования, могут быть вычислены автоматически или заданы по умолчанию. Пользователь языка должен задавать лишь ту информацию, которая действительно необходима для решения поставленной задачи.

Программа на ПОЯ «Моделирование» имеет простую структуру, без ветвлений и циклов. Программа — это последовательность операторов вычислительного алгоритма, описывающих конкретную задачу моделирования. Оператор — это законченная фраза языка. Точка с запятой указывает на конец оператора. Операторы строятся из таких элементов, как служебные ключевые слова, идентификаторы, числа, выражения, разделители. Элементы, в свою очередь, строятся из символов языка (рис. 5.6).

Программа на ПОЯ записывается в наборе данных, содержащем запись фиксированной длины. Элементы языка (служебные слова, идентификаторы, числа и разделители) не могут содержать внутри себя пробелы и не могут переноситься с одной записи на другую. Конструкции же более высокого уровня — выражения, операторы — могут переноситься и содержать пробелы в любом месте между служебными словами, идентификаторами, числами, разделителями. Между этими конструкциями языка кроме пробелов могут быть вставлены комментарии, которые заключаются в разделители.

Символы ПОЯ в основном совпадают с соответствующими символами языков ФОРТРАН, ПЛ/1.

* Сольщиков Р. Н., Пресняк А. С., Тергерова Н. М. Методы исследования сложных систем на ЭВМ, Л., 1984.

Идентификаторы предназначены для обозначения величин, имеющих определенный физический или математический смысл в решаемой задаче. Идентификаторы могут определять следующие типы переменных: независимую переменную — время; параметры системы — константы, значения которых в течение одного варианта расчета не меняются; переменные состояния, поведение которых задается дифференциальными уравнениями и начальными условиями (такие переменные меняются непрерывно); дискретно изменяемые переменные, поведение которых задается разностными уравнениями; промежуточные переменные, используемые для удобства задания входных воздействий и связей между звеньями системы.

Кроме этого, идентификаторы могут определять имена функций.

Примеры идентификаторов:

Y, T01, R187, АРГУМЕНТ

Если не считать атрибута *размерность*, то синтаксис вещественных чисел ПОЯ лишь незначительно отличается от соответствующих конструкций языков ФОРТРАН и ПЛ/1.

Одной из сервисных возможностей ПОЯ является возможность задания размерностей для различных физических величин. Цель задания размерности для чисел — автоматизация их перевода в СИ. Если размерность указывается после идентификатора, то при печати численное значение этой переменной будет преобразовано из СИ к указанным единицам. Для проверки введенной ММ предусмотрен режим контроля физических размерностей величин на соответствие.

Размерности могут задаваться для идентификаторов и чисел. Они всегда заключаются в квадратные скобки и не могут переноситься с одной строки на другую. Размерности составляются из базовых размерностей, которые включают: Г — грамм, КГ — килограмм, С — секунда, МИН — минута, ЧАС — час, ММ — миллиметр, СМ — сантиметр, М — метр, КМ — километр, МИЛЛ — миля, ° — угловая секунда, ' — угловая минута, ГРАД — угловой градус, РАД — радиан, УЗЕЛ — узел (миль/ч), ОБ — оборот (2 рад), ГС — грамм-сила, КГС — килограмм-сила, Н — ньютон, А — ампер, В — вольт, % — процент, ПОЗ — позиция АЦПУ (используется только при выводе результатов на АЦПУ).

Размерность строится по усеченным правилам построения выражений. В общем случае размерность — это дробь, числителем и знаменателем которой представляют собой произведение базовых размерностей и их степеней. Степень может быть только целой и положительной, причем может состоять только из одной цифры. Размерность не может содержать круглые скобки. Разделение размерности на числитель и знаменатель осуществляется знаком «/». Например, размерности $[RAD/С*Ж*2]$ и $[RAD/С*Ж*С]$ эквивалентны.

Числителем может являться безразмерная единица, например $[1/С]$.

Примеры правильно записанных размерностей:

$[КГ*М/С] [Г*СМ*Ж*2] [П/Н]$

Примеры неправильно записанных размерностей:

$[С*Ж*2] [(М*Н)*3/КГ] [РАД/С/С]$

Выражения являются важнейшими элементами языка. Они позволяют аналитически задавать различные элементы ММ исследуемой системы.

Выражения на ПОЯ «Моделирование» определяются почти так же, как выражения в языках программирования ФОРТРАН и ПЛ/1. Выражения образуются из операндов, знаков операций и круглых скобок.

Выражения в этом ПОЯ имеют несколько иной смысл, чем в традиционных языках программирования. Они определяют математическую зависимость, а не формулы, по которым должен производиться расчет, поэтому в состав функций входит такая, например, как DIF (производная).

Обычное выражение в простейшем случае может являться числом или идентификатором, например $A\ 3.1415926$.

Обобщенное выражение всегда должно содержать по крайней мере одну операцию или функцию. Примерами таких выражений являются

$X+Y, 3.5+7*К-X, F(X, Y), Z'-Z''$

$DIF(Z), (A-2*В)* (В*2-C), A+3*(A-B)-С*Ж*2$

Круглые скобки используются для задания порядка выполнения операций, отличного от порядка, установленного старшинством операций. Старшинство (ранги) операций следующие:

1. ' — производная.
2. $*$ — возведение в степень.
3. $*$, / — умножение и деление.
4. +, — сложение и вычитание.

Операции одного старшинства выполняются слева направо. С помощью операторов ПОЯ можно описывать ММ исследуемых систем, задавать параметры численного интегрирования, инициализировать (запускать) численное решение задачи, выводить результаты в виде чисел, таблиц и графиков. Приведем здесь основные операторы этого ПОЯ.

1. Операторы задания ММ. ММ задаются звеньями, связями между ними, входными воздействиями и зависимостями выходных переменных от переменных непрерывного и дискретного состояния и времени. Звенья непрерывной части динамической системы могут задаваться системами дифференциальных уравнений (СДУ) и передаточными функциями в случае линейных звеньев (ЛЗ). Элементы дискретной части систем описываются системами разностных уравнений (РУ) или дискретными линейными звеньями (ДЛЗ). Связи между звеньями задаются естественным образом путем установления соответствующих аналитических зависимостей.

Такие зависимости могут быть заданы непосредственно в операторах СДУ, ЛЗ, РУ, ДЛЗ и специальных операторах, задающих алгебраические связи между выходами одних звеньев и входами других. В частности, линейные непрерывные звенья задаются оператором ЛЗ, формат которого следующий:

ЛЗ: И - ОВ*П.

Здесь идентификатор слева от знака равенства является численным именем выхода линейного звена, а идентификатор справа именем входа. ОВ представляет собой передаточную функцию звена в операторной форме. В качестве ОВ можно использовать дробно-рациональную функцию от s , где s - аргумент преобразования Лапласа. В результирующем выражении степень полинома числителя должна быть не больше степени полинома знаменателя по соображениям физической реализуемости. В операторе ЛЗ идентификатор s должен использоваться только как обозначение аргумента преобразования Лапласа.

Пример правильной записи оператора:

ЛЗ: Y - ((1+A*s)/(1+5*s**2)+(C+D/s))*X;

ЛЗ: I = 1/s*U

Пример неправильной записи оператора:

ЛЗ: Y = X/s

ЛЗ: Z = (s+1)*U

В первом операторе неправильно задано ОВ, определяющее передаточную функцию, а во втором - степень полинома числителя больше степени полинома знаменателя.

В результате обработки оператора формируется система линейных дифференциальных уравнений в нормальной форме с нулевыми начальными условиями, которая присоединяется к системе уравнений, заданной операторами СДУ.

Пример 5.5. Описание ММ звена погр. ИР (см. пример 4.2) с учетом управления в системе U и внешнего воздействия F - анал. од.

СДУ: X' = -Y, Y' = -G/L * SIN(X) FTR: *SIN(Y) + F - U;

НУ: X = A, Y = 0.05;

ЛЗ: U = (1+s)/(2 * 3 * T1 * s**2) * Y; G = 98; L = 0.9; M = 78; FTR = 0.7; T1 = 0.02; B = 15; T2 = 0.05 * SIN(X * T); E = M * G * L * (1 - COS(Y)) + M + Y * s**2.

Выходные величины: X, E;

II. Операторы задания параметров численного интегрирования. Операторы могут задаваться в произвольной последовательности вместе с операторами первой группы. Однако все необходимые параметры должны быть заданы до оператора РЕШИТЬ. Повторное определение одного и того же параметра заменяет старое значение на новое. Операторы имеют следующий формат:

ТОЧНОСТЬ: <Число>;

МЕТОД ИНТЕГРИРОВАНИЯ: <целое число>;

ШАГ ИНТЕГРИРОВАНИЯ: <число>;

ИНТЕРВАЛ: <число>;

КОЛИЧЕСТВО ТОЧЕК: <целое число>;

ШАГ ВЫВОДА: <число>;

Параметр ТОЧНОСТЬ определяет относительную ошибку на всем интервале интегрирования.

Параметр ШАГ ИНТЕГРИРОВАНИЯ определяет величину первого шага интегрирования. Его следует задавать на 2—4 порядка меньше, чем предполагаемый рабочий шаг интегрирования. В процессе интегрирования шаг будет меняться в зависимости от свойств решения в соответствии с используемым алгоритмом численного интегрирования.

Параметр МЕТОД ИНТЕГРИРОВАНИЯ задает код численного интегрирования. Допустимые значения: 10, 11, 12, 13, 20, 21, 22, 23. Параметр состоит из двух цифр. Первая цифра имеет следующие значения:

1 — для неявных методов Адамса (5.47);

2 — для методов Куртиса Хиршфельдера (5.49), (5.50).

Вторая цифра определяет метод решения нелинейных алгебраических уравнений (5.50), который используется в неявных схемах на каждом шаге численного интегрирования. Параметр ИНТЕРВАЛ определяет временной интервал численного решения. Параметр ШАГ ВЫВОДА задает шаг между двумя соседними моментами времени, когда должно производиться запоминание выходных переменных. Для запуска задачи на решение служит оператор, вид которого следующий: РЕШИТЬ СДУ;

До этого оператора в программе должны располагаться операторы задания ММ и параметров численного интегрирования. Если же такие операторы расположены после оператора РЕШИТЬ СДУ, то они участвуют в модификации ММ или ее параметров.

По оператору РЕШИТЬ СДУ автоматически строится численная процедура расчета и происходит собственно расчет временных процессов. Если между двумя такими операторами структура моделируемой системы не меняется, а меняются только числовые значения параметров и начальные условия, то этап построения численной процедуры отсутствует что снижает общие затраты.

Для вывода полученной в результате решения информации в виде таблиц и/или графиков используется оператор ВЫВЕСТИ. Информация, выводимая с помощью данного оператора, к моменту его выполнения должна быть оформлена. Предусмотрены следующие формы вывода: таблицы, графики, таблицы и графики с установкой соответствующих масштабов (ТАБ, Г). На рис. 5.7 приведен пример формирования задания на моделирование. В этом примере приняты обозначения моментов инерции ($A, B, C, D, J, D_1, D_2, D_3$), кинетического момента гироскопа (H), коэффициентов вязкого трения (k_1, k_2, k_3), параметров управления ($U(k), T_1$), возмущения $M_{вн}$, которые обычно применяются для САР этого класса (см. [13, с. 94], а также рис. 4.8). На рис. 5.7 эти параметры соответственно обозначены A1, B1, B2, B3, B4, JD, D, H, H1, H2, H31, KCC, T1, MB1.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНООСНОГО ГИРСТАБИЛИЗАТОРА
* ALFA - угол стабилизации, BETA - угол прецессии */

СДУ ALFA -DALFA,
BETA -DBETA,
DBETA -(H21*DBETA+H*DALFA+H*DELTA)/B,
DELTA -DELTA,
DELTA -(H31*DELTA-C*DELTA+H*(BETA)/D,
C=1/T1*(BETA-U)-DBETA,
DDALFA (-H11*DALFA+C*DELTA KCC*2+MB1)/RO,
RO A1+D*B1+B2+B3.

* ЧИСЛЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ */

A1 5700[Г*СМ* **2], B2 825[Г*СМ*С**2],
B3 825[Г*СМ*С**2],
D+B1-26F.97[Г*СМ*С**2], H11 10000[Г*СМ*С*],
H21-C 3[Г*СМ*С*], H31 1E3[Г*СМ*С*],
H 15E3[Г*СМ*С*] B4 4 7[Г*СМ*С**2],
D 7[Г*СМ*С**2], C 3E7[Г*СМ/РАД],
KCC 1 8E5[Г*СМ/РАД], T1 0 0760[С]
MB1 2E4[Г*СМ]

начальные условия ALFA 0 12E 6 DALFA 0 076E 6,
BETA=0 19E 6 DBETA 0 05E 6
DELTA=0 1E 6 DDELTA=0 03E 6,
U=0 08E 6;

/* ПАРАМЕТРЫ ЧИСЛЕННОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ */

интервал интегрирования 0.1,
метод интегрирования 10,
шаг интегрирования 0 1E 5,
точность 1E 4,
кол точек 70;
выходные величины ALFA, BETA, U,
решить СДУ,
вывести (ALFA,BETA),

/* ПЕРЕХОДНЫЙ РЕЖИМ */

MB1 10000[Г*СМ*];
решить СДУ;
вывести ALFA форма ТТ поле 0 09,
BETA форма ТТ поле 0 09;

/* ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ */

H11 5000[Г*СМ*С*];
решить СДУ;
вывести ALFA форма ТТ поле 0 09,
BETA форма ТТ поле 0 09;

/* РЕЖИМ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ */

интервал интегрирования: 0.2,
MB1-1E4[Г*СМ*С*]H5[Г*СМ*Т];
W 2[Г*С];
решить СДУ;
вывести ALFA форма ТТ поле 0.09,
BETA форма ТТ поле 0.09,

ЗАДАНИЕ

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ГСП
К УДАРНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ММ ГСП, (уравнение ())

Численные значения параметров ГСП

A1=0.51[Г*С*М**2], B2=U 076[Г*С*М**2], B3 0 088[Г*С*М**2],
A3 0 081[Г*С*М**2],
H1 47[H*М*С], C3=0.100[Г*С*М**2], B=0.46E-3[Г*С*М**2],
D=0 685E 3[Г*С*М**2], H11-H12-H13=0.294[H*М*С],
H21-H22 H23=0.294E 4[H*М*С], H31 H32-H33 0 09E[H*М*С],
IDB1-IDB2 IDB3 0.026[Г*С*М**2],MCTR1-MCTR2=MCTR3=0 48[H*М],
M1 M, M3 17.44[H*М/РАД], T11=0.0286[С], T12 T13 0 0154[С],
MB1=1.960[H*М], MB2-MB3 0 490[H*М]

РЕЗУЛЬТАТ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Система стабилизации устойчива;

время (Т) переходных процессов по углам стабилизации

ALF1, ALF2, ALF3

T1=0.980[С], T2=0.980[С], T3=1.020[С].

максимальное отклонение углов стабилизации (ALF1, ALF2,

ALF3) и прецессии (BET1,BET2,BET3) на промежутке 0<Т<5[С]
в РАД -

ALF1=0.167E 3, ALF2=0.141E-3, ALF3=0 283E-3,

BET1=0.155E-1, BET2=0.781E-1, BET3=0.253E 1

Рис. 57. Задание на моделирование ОТС

Рис. 58. Проектная процедура, выполненная инструментом «Моделирование»

Обращение к подсистеме «Моделирование» со стороны пользователей - проектировщика с ТП или от другой подсистемы САПР САУ — осуществляется путем формирования задания на ПОЯ «Моделирование», а связь с подсистемой «Моделирование» определяется принятой структурой ППО САПР (см. § 3.4). В заключение этой главы на рис. 5.8 приведен проектный документ, завершающий проектную процедуру, выполненную подсистемой «Моделирование».

ГЛАВА 6 АВТОМАТИЗАЦИЯ АНАЛИЗА САУ

§ 6.1. Методы анализа САУ и их применение в САПР

Под анализом (греч. *análisis* — расчленение) понимается процесс разделения изучаемого объекта и его свойств на составляющие с дальнейшим наиболее полным выявлением характеристик объекта в зависимости от условий его функционирования.

Процедуры анализа органически входят во всякое научное исследование и обычно образуют его первую стадию, хотя и на последующих стадиях анализ сохраняет свое значение, выступая в единстве с другими процедурами исследования и проектирования. В САПР САУ инструменты анализа непосредственно связаны с инструментами синтеза и моделирования. В частности, задачи синтеза часто удается свести к многократному решению соответствующих задач анализа. Инженерный анализ САУ традиционно проводится алгебраическими, частотными и корневыми методами с привлечением гармонической линеаризации, статической линеаризации, вариантов метода малого параметра. Применение традиционных «ручных» методов анализа к сложным, особенно нелинейным, САУ при решении практических задач в большинстве случаев оказывается затруднительным, напротив использование инструментов САПР САУ весьма плодотворно. В этой главе рассматриваются возможности применения машинно-ориентированных традиционных и собственно машинных методов анализа САУ и излагаются машинно-аналитический метод, разработанный с учетом особенностей САУ. Компоненты лингвистического и программного обеспечения подсистемы «Анализ» строятся аналогично соответствующим компонентам подсистем САПР САУ, рассмотренным в гл. 4, 5, и будут изложены в § 6.4.

Методы, которые образуют компоненты математического обеспечения подсистемы САПР САУ «Анализ», в соответствии с составом математического обеспечения САПР САУ (см. § 3.2) включают в себя:

1) машинно-ориентированные традиционные методы анализа САУ (алгебраические, частотные, гармонической и статической линеаризации);

2) специально машинные методы, основанные на представлении процессов анализа САУ последовательностью реализуемых на ЭВМ операций над исходными и промежуточными числовыми данными; эти методы практически непригодны при отсутствии ЭВМ;

3) машинно-аналитические методы, необходимым условием применения которых также является наличие ЭВМ, но в отличие от предыдущих промежуточные и конечные результаты исследования могут быть получены не в числовой, а в аналитической форме.

В данном параграфе рассматриваются методы первой группы, которые, по-видимому, и применялись «первыми пользователями» ЭВМ. С середины 50-х годов они использовались для построения амплитудно-фазовых частотных характеристик (АФЧХ), областей Д-разбиения, корневых годографов.

Традиционные методы анализа САУ изложены в многочисленных работах по теории САУ и, как правило, являются скалярными, предназначенными для простых систем невысокого порядка. Такой подход оправдан тем, что при отсутствии ЭВМ анализ и расчет осуществлялись путем приближенных теоретических исследований в сочетании с макетированием и испытаниями, которые составляли, да и сейчас еще составляют большую часть инструментария проектировщика.

Машинная ориентация традиционных методов с целью применения их в САПР состоит в том, чтобы распространить их на многомерные системы высокого порядка, качество САУ определять не по одному, а по многим критериям, упростить и ускорить процедуру получения конечных результатов, а также осуществить сервисное представление результатов (графиков, таблиц, расчетных данных) с помощью средств САПР.

Традиционный анализ САУ сводится к анализу устойчивости, качества и точности. В таком же порядке рассмотрим его машинную ориентацию.

Машинная ориентация методов оценки устойчивости. Как известно, оценку устойчивости линеаризованной САУ можно осуществлять алгебраическими (коэффициентами), частотными и корневыми методами.

1. Алгебраические методы. Эти методы позволяют по коэффициентам характеристического уравнения системы (3.11)

$$a_p \lambda^n + a_{p-1} \lambda^{n-1} + \dots + a_1 \lambda + a_0 = 0 \quad (6.1)$$

определять необходимые и достаточные условия нахождения действительных частей корней в левой полуплоскости комплексной переменной λ . Для применения коэффициентных методов необходимо получить характеристическое уравнение (6.1) исходной системы (3.11), что сводится к раскрытию определителя

$$D(\lambda) = |E - A| \quad (6.2)$$

Непосредственное раскрытие определителя (6.2) эквивалентно вы-

численно диагональных миноров матрицы A . Действительно, после приведения при $a_0 \neq 0$, в частности $a_0 = 1$, уравнения (6.1) к форме

$$\lambda^n + a_1 \lambda^{n-1} + \dots + a_n = 0 \quad (6.3)$$

оказывается, что $a_1 = S_p A = \sum_{i=1}^n a_{ii}$ — сумма диагональных элементов матрицы A ; a_2 — сумма всех диагональных миноров второго

порядка матрицы A ; ...; a_n — определитель матрицы A . При этом вычислительные затраты оказываются весьма значительными. Так, при $n=9$ требуется 986 400 операций умножения и 725 758 операций сложения. Машинная ориентация процедуры раскрытия определителя (6.2) состоит в выборе из существующих и разработке специальных методов, сокращающих вычислительные затраты. К существующим методам раскрытия определителя относятся классические методы А. М. Данилевского (советский математик, 1906—1942); У. Ж. Ж. Леверье и Д. К. Фаддеева (французский и советский математик, 1811—1877; 1907 г.). Сущность метода А. М. Данилевского состоит в приведении матрицы

$$(\lambda E - A) = \begin{pmatrix} -a_{11} + \lambda, & \dots, & -a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{n1}, & \dots, & a_{nn} - \lambda \end{pmatrix} \quad (6.4)$$

к нормальному виду — матрице Ф. Г. Фробениуса (немецкий математик, 1849—1917)

$$(\lambda E - A) = \begin{pmatrix} -a_1 + \lambda, & a_2, & -a_3, \dots, -a_n \\ 1, & \lambda, & 0, \dots, 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & & & & 1, \lambda \end{pmatrix},$$

элементы $a_1, a_2, \dots, a_n$ которой и представляют собой коэффициенты характеристического уравнения (6.3). Переход от матрицы $(\lambda E - A)$ к $(\lambda E - A)$ осуществляется путем преобразования подобия матрицы A .

$$\bar{A}_k = C_k^{-1} A C_k, \quad k = \overline{1, I}, \quad \bar{A}_1 = A.$$

В качестве преобразующих матриц C_k выбираются матрицы, последовательно преобразующие строки матрицы A начиная с последней в соответствующие строки матрицы $\bar{A}$.

Общее число операций при реализации метода А. М. Данилевского снижается по сравнению с прямым раскрытием определителя (6.2). Так, для $n=9$ требуется 648 операций умножения и 576 сложения. Метод Данилевского положен в основу стандартных программ программного обеспечения ЦВМ. Использование этого метода в практике расчета САУ на ЭВМ показало, что при $n > 6$

метод А. М. Данилевского имеет значительные погрешности из-за вырождения промежуточных подобных матриц (их элементы оказываются близкими к 0 при $n > 6$).

Метод Леверье — Фаддеева основан на известной формуле Ньютона для сумм степеней корней характеристического полинома (6.3)

$$S_k = \lambda_1^k + \lambda_2^k + \dots + \lambda_n^k;$$

$$S_k + a_1 S_{k-1} + \dots + a_{k-1} S_1 = -k a_k, \quad k = \overline{1, n},$$

откуда

$$a_1 = -S_1;$$

$$a_2 = -\frac{1}{2}(S_2 + 2a_1 S_1);$$

$$\dots \dots \dots$$

$$a_n = -\frac{1}{n}(S_n + a_1 S_{n-1} + \dots + a_{n-1} S_1).$$

Суммы $S_1, S_2, \dots, S_n$ можно найти на основе известных формул линейной алгебры

$$S_1 = \sum \lambda_i = S_p A;$$

$$S_2 = \sum \lambda_i^2 = S_p A^2;$$

$$\dots \dots \dots$$

$$S_n = \sum \lambda_i^n = S_p A^n.$$

Число операций умножения в этом методе оказывается большим, чем в предыдущем, причем для $n=9$ требуется 5228 операций умножения и 4644 сложения. Однако в отличие от предыдущего метода он нечувствителен к особенностям матриц A . В то же время метод Леверье — Фаддеева быстро накапливает ошибку округления начиная с $n=7$.

Метод, свободный от недостатков предыдущих классических методов, строится с учетом особенностей машинной реализации, в том числе разреженности исходной матрицы A . Изложим его подробно*.

Общее выражение определителя матрицы размерности n имеет вид

$$\det A = \sum (-1)^v a_{1d_1} a_{2d_2} \dots a_{nd_n},$$

* Расчет систем управления с применением СМ ЭВМ/В. Н. Андронов, Д. Х. Исаев и др. Л., 1987.

где сомножители a_{jd_j} представляют собой элементы матрицы A ; v — число инверсий перестановки $(d_1, d_2, \dots, d_n)$.

Каждое произведение $a_{1d_1} a_{2d_2} \dots a_{nd_n}$ должно содержать элементы матрицы a_{jd_j} , расположенные в различных строках и различных столбцах. Это означает, что среди всех первых индексов, как и среди всех вторых, не должно быть одинаковых. Если расположить первые индексы в порядке их возрастания, как это сделано выше, то совокупность вторых индексов образует некоторую перестановку $(d_1 d_2 \dots d_n)$.

Число инверсий v перестановки $(d_1 d_2 \dots d_n)$ определяет знак слагаемого определителя матрицы и находится следующим образом: для каждого из чисел $d_j, j=1, \dots, n$, определяется количество стоящих правее его меньших чисел, и полученные результаты складываются.

Элементы матриц могут быть как отличны от нуля, так и строго равны нулю. Матрица, имеющая небольшую часть ненулевых элементов, называется *разреженной*. Очень часто матрицы, связанные с моделями САУ, оказываются такими.

Вычисление определителей разреженных матриц связано с нахождением только ненулевых слагаемых и расчетом их знака, что может существенно сэкономить вычислительные затраты.

Рассмотрим алгоритм вычисления определителя разреженной матрицы. Будем рассматривать общий случай полиномиальной матрицы. Алгоритм работает только с ненулевыми элементами матрицы, которые могут быть пронумерованы от 1 до NP .

Вначале находится индексное выражение очередного слагаемого определителя. Оно представляет собой массив, состоящий из n номеров ненулевых элементов матрицы, образующих слагаемое. Задача отыскания индексных выражений слагаемых определителя можно свести к поиску особых путей в специальном графе Γ . Каждая его вершина соответствует ненулевому элементу a_{ij} матрицы и имеет вес в виде полнома от λ . Каждая дуга графа направлена из вершины, соответствующей элементу i -й строки матрицы, $i=1, n-1$, в вершину $(i+1)$ -й строки, принадлежащую другому столбцу:

$$\Gamma(a_{ij}) = \{a_{i+1, l}\}, i = 1, n-1; l=1, \dots, n, j \neq l, a_{ij} \neq 0; a_{i+1, l} \neq 0.$$

Элементы первой строки являются истоками, а последней — стоками графа. Ненулевому слагаемому определителя матрицы в графе соответствует особый путь от истока к стоку, который содержит вершины, отвечающие элементам матрицы из разных столбцов. Множество таких путей в точности образует множество ненулевых слагаемых определителя. Выражение для определителя мат-

рицы можно записать следующим образом:

$$\det A = \sum_{s=1}^{N^*} (-1)^s P_s, \quad (6.5)$$

где N^* — число слагаемых определителя; P_s — вес s -го пути, равный произведению весов вершин пути. Знак слагаемого, иначе число инверсий v , находится непосредственно по вторым индексам вершин, входящих в путь.

Схема алгоритма расчета определителя разреженной полиномиальной матрицы приведена на рис. 6.1.

Входными данными алгоритма являются числа и массивы, представляющие ненулевые элементы полиномиальной матрицы: N — размер матрицы; NP — число ненулевых элементов матрицы; MTM — целочисленный массив номеров строк и столбцов ненулевых элементов, каждому i -му ($i=1, \dots, NP$) ненулевому элементу которой соответствуют два элемента массива: $(2 \times i - 1)$ -й указывает номер строки, а $(2 \times i)$ -й указывает номер столбца; MCM — целочисленный массив степеней полиномов элементов матрицы; AM — вещественный массив коэффициентов полиномов элементов матрицы; элементы матрицы записываются в порядке возрастания их номеров, коэффициенты каждого полинома записываются начиная со свободного члена.

Выходными параметрами алгоритма являются: NXP — степень полинома определителя полиномиальной матрицы; XP — вещественный массив коэффициентов полинома определителя, NA — число ненулевых слагаемых определителя, IER — параметр ошибки, принимающий два значения $\{0, 1\}$: 0 — «все в порядке», 1 — определитель строго равен нулю.

Пример 6.1. Расчет характеристического полинома системы РЛП (см. рис. 3.9, 6). Матрица A^* линейных дифференциальных уравнений этой САУ, представленных в форме (3.11), имеет вид

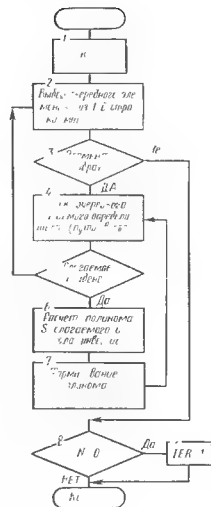


Рис. 6.1. Схема алгоритма расчета определителя

$$A = \begin{pmatrix} -10 & -25 & 0 & 3,3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -0,5 & 1,5 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -0,33 \end{pmatrix}$$

Для нахождения определителя матрицы по формуле (6.5) требуется вычислить определитель (6.2), который составляется по полиномиальной матрице (λE A):

$$D(\lambda) = \det \begin{pmatrix} \lambda + 10 & 25 & 0 & 3,3 \\ 1 & 4 & 9 & 0 \\ 0 & \lambda & -1 & 0 \\ -1 & 0,5 & \lambda + 1,5 & 0 \\ 2 & 6 & 8 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & \lambda + 0,33 \\ 3 & 0 & 0 & 10 \end{pmatrix},$$

где жирным шрифтом представлены порядковые номера ненулевых элементов матрицы λE A. Входные данные алгоритма запишутся следующим образом: $N=4$, $NP=10$, $MTM=(1,1; 3,1; 4,1; 1,2; 2,2; 3,2; 3,3; 1,4; 4,4)$, $MCM=(1; 0; 0; 0; 1; 0; 1; 0; 1; 0; 1; 1; 1; 25; 0,1; 0,5; 1; 1,5; 1; -3,3; 0,33; 1)$.

Специальный граф для этой матрицы приведен на рис. 6.2, а.

В графе имеется пять особых путей, соответствующих ненулевым слагаемым определителя. Общее же число слагаемых равно $N!=24$. Следовательно, 19 из них являются нулевыми и не определяются рассматриваемым алгоритмом. На рис. 6.2, б показаны два пути, выходящие из вершины 1, а на рис. 6.2, в — один путь из вершины 4, выделенный жирной линией, и два пути из вершины 9. Характеристики путей приведены в табл. 6.1.

Искомый определитель искомой матрицы находится по формуле (6.5) в результате суммирования весов путей, взятых с соответствующим знаком:

$$D(\lambda) = \lambda^4 + 11,83\lambda^3 + 15,995\lambda^2 + 30,165\lambda + 8,25.$$

При реализации алгоритма на ЭВМ получаются следующие результаты: $NXP=4$, $XP=(8,25, 30,165, 15,995, 11,83, 1)$; $NA=5$, $IER=0$.

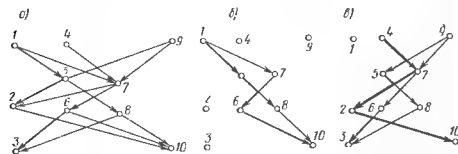


Рис. 6.2. Специальный граф для расчета характеристического полинома

Таблица 6.1. Характеристики путей графа

Номер пути	Индексное выражение	Перестановка	Число инверсий	Вес пути
1	1, 5, 8, 10	1, 2, 3, 4	0	$\lambda^4 + 11,83\lambda^3 + 18,795\lambda^2 + 4,95\lambda - 0,5\lambda^2 - 5,165\lambda - 1,65$
2	1, 7, 6, 10	1, 3, 2, 4	1	$25\lambda + 8,25$
3	4, 7, 2, 10	2, 3, 1, 4	2	$3,3\lambda^2 + 4,95\lambda - 1,65$
4	9, 5, 8, 3	4, 2, 3, 1	5	
5	9, 7, 6, 3	4, 3, 2, 1	6	

Таким образом, получение характеристического полинома (6.1) обеспечивается стандартными и специальными программами, реализуемыми на ЦВМ. В то же время надо всегда иметь в виду, что построение полинома (6.1) для каждого частного вида матрицы A может встретить много препятствий вычислительного характера, преодоление которых зависит от искусства алгоритмиста и программиста. Перейдем теперь непосредственно к критериям оценки устойчивости по полиному (6.1).

Критерий А. Гурвица (немецкий математик, 1859—1919) сводится к установлению положительности главных миноров определителя вида:

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} a_1 & a_0 & 0 & \dots & 0 \\ a_2 & a_1 & 0 & \dots & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & a_n & \dots & 0 \end{vmatrix}, \quad \Delta_1 > 0, \Delta_2 > 0, \Delta_n > 0.$$

При условии, что $a_0 > 0$, для реализации критерия Гурвица требуется вычисление $n-2$ определителей, что при $n > 10$ приводит к весьма значительному расходу машинного времени. Напомним, что число операций умножения при вычислении определителя, например 9-го порядка, 986400.

Более удобен при машинной реализации критерий, который строится по определителю Гурвица и требует оценок:

$$a_i > 0, \quad i = 1, \dots, n$$

$$\Delta_1 > 0, \Delta_2 > 0, \dots, \Delta_{n-1} > 0, \text{ если } n \text{ четно;} \\ \Delta_2 > 0, \Delta_4 > 0, \dots, \Delta_n > 0, \text{ если } n \text{ нечетно.}$$

Число вычислительных операций в этом случае значительно уменьшается.

В некоторых случаях целесообразно для машинной реализации воспользоваться предложенным венгерским математиком К. Ландошем критерием. Для его применения в характеристическом уравнении (6.1) произведем замену переменных $\lambda = 1 - \rho / (1 + \rho)$. Тогда вместо (6.1) получим $b_0\rho^n + b_1\rho^{n-1} + \dots + b_n = 0$.

При $\operatorname{Re}(\lambda) < 0$ преобразование $\lambda \rightarrow (1-\rho)/(1+\rho)$ отображает левую полуплоскость λ внутрь круга единичного радиуса плоскости ρ . Поэтому необходимым и достаточным условием устойчивости будет

$$|p_i| < 1, \quad i = \overline{1, n}.$$

Машинная реализация этого неравенства сводится к проверке условий

$$\frac{b_1}{b_0} < 1, \quad \frac{b_2}{b_1} < 1, \dots, \quad \frac{b_n}{b_{n-1}} < 1,$$

что с вычислительной точки зрения также является более экономичным, чем вычисление определителей Гурвица.

Наиболее эффективен с вычислительной точки зрения алгоритм на основе алгебраического критерия, предложенного английским математиком Э. Раусом еще в 1877 г. Запишем характеристистический полином (6.1) в виде, ориентированном на применение ЭВМ, когда коэффициенты полинома являются элементами некоторого массива A :

$$D(\lambda) = A(1)\lambda^N + A(2)\lambda^{N-1} + \dots + A(N)\lambda + A(N+1). \quad (6.6)$$

Алгоритм Рауса поясняется в табл. 6.2. Число строк таблицы Рауса равно степени характеристического полинома плюс единица ($N+1$).

В первой строке табл. 6.2 записывают коэффициенты характеристического полинома (6.6) — элементы массива A в порядке возрастания номеров, имеющих нечетные номера $A(1), A(3), \dots$; во второй строке — элементы с четными номерами $A(2), A(4), \dots$.

Остальные коэффициенты таблицы вычисляются по формуле

$$C_{ki} = C_{k+1, i-2} - r_k C_{k+1, i-1},$$

где $r_k = C_{k+1, 2}/C_{k+1, 1}$; k — номер строки; i — номер строки таблицы.

Суждение об устойчивости системы делается по коэффициентам первого столбца таблицы. Для того чтобы корни полинома находились слева от мнимой оси, необходимо и достаточно, чтобы коэффициенты первого столбца таблицы Рауса были одного знака; например при $A(1) > 0$

$$C_{11} = A(1) > 0, \quad C_{12} = A(2) > 0, \quad C_{13} > 0, \dots, \quad C_{1, N+1} > 0.$$

Если не все коэффициенты первого столбца имеют один и тот же знак, то не все корни полинома лежат слева от мнимой оси и число корней справа от мнимой оси равно числу перемен знака в первом столбце таблицы Рауса.

Изложен эффективный вычислительный алгоритм расчета элементов таблицы, не требующий введения дополнительных массивов*. Исходными данными для алгоритма являются степень и

* Острём К. Введение в стохастическую теорию управления, М., 1973.

Таблица 6.2. Таблица Рауса

Коэффициенты r_i	Номер строки	Номер столбца			
		1	2	3	4
1	1	$C_{11} = A(1)$	$C_{21} = A(3)$	$C_{31} = A(5)$	$\dots$
—	2	$C_{12} = A(2)$	$C_{22} = A(4)$	$C_{32} = A(6)$	$\dots$
$r_3 = A(1)/A(2)$	3	$C_{13} = C_{21} - r_3 C_{22}$	$C_{23} = C_{31} - r_3 C_{32}$	$C_{33} = C_{41} - r_3 C_{42}$	$\dots$
$r_4 = A(2)/C_{13}$	4	$C_{14} = C_{22} - r_4 C_{23}$	$C_{24} = C_{32} - r_4 C_{33}$	$C_{34} = C_{42} - r_4 C_{43}$	$\dots$
$r_5 = C_{13}/C_{14}$	5	$C_{15} = C_{23} - r_5 C_{24}$	$C_{25} = C_{33} - r_5 C_{34}$	$C_{35} = C_{43} - r_5 C_{44}$	$\dots$
$r_i = \frac{C_{i-2, 1} - 2}{C_{i-1, 1}}$	i	$C_{1i} = C_{2i-2} - r_{i-2} C_{2i-1}$	$C_{2i} = C_{3i-2} - r_{i-2} C_{3i-1}$	$C_{3i} = C_{4i-2} - r_{i-2} C_{4i-1}$	$\dots$

Таблица 6.3. Таблица Рауса

Коэффициент R	Номер строки	Номер столбца			
		1	2	3	4...
—	1	$A(1)$	$A(3)$	$A(5)$	$\dots$
—	2	$A(2)$	$A(4)$	$A(6)$	$\dots$
$R = A(1)/A(2)$	3	$A(3) = A(3) - RA(4)$	$A(5) = A(5) - RA(6)$	$A(7) = A(7) - RA(8)$	$\dots$
$R = A(2)/A(3)$	4	$A(4) = A(4) - RA(5)$	$A(6) = A(6) - RA(7)$	$A(8) = A(8) - RA(9)$	$\dots$
$R = A(i-2)/A(i-3)$	i	$A(i) = A(i) - RA(i+1)$	$A(i+2) = A(i+2) - RA(i+3)$	$A(i+4) = A(i+4) - RA(i+5)$	$\dots$

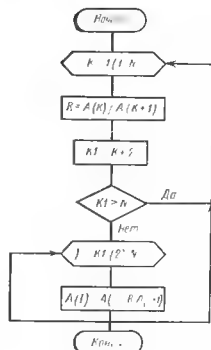


Рис. 6.3. Схема усовершенствованного алгоритма Рауса

массив A коэффициентов полинома. В результате работы алгоритма в массиве A находятся коэффициенты первого столбца Рауса. Схема алгоритма приведена на рис. 6.3. Работа алгоритма для полинома n -й степени (6.6) поясняется табл. 6.3. В первых двух строках табл. 6.3 находятся элементы массива A , в которых записаны коэффициенты полинома - исходные данные для алгоритма. В первом столбце табл. 6.3 после окончания работы алгоритма располагаются элементы массива A , в которых находятся коэффициенты первого столбца таблицы Рауса. Элементы таблицы Рауса вычисляются начиная с 3-й строки, а в каждой строке - слева направо. Можно убедиться, что результаты расчетов по табл. 6.2 и 6.3 совпадают, эффективность вычислений во втором случае выше.

Пример 6.2. Пусть требуется исследовать устойчивость системы, характеристическое

уравнение которой имеет вид

$$\lambda^6 + 6\lambda^5 + 21\lambda^4 + 44\lambda^3 + 62\lambda^2 + 52\lambda + 100 = 0.$$

Работа алгоритма поясняется табл. 6.4, в которой римскими цифрами указана последовательность вычислений элементов таблицы. Этот расчет можно сравнить с расчетом традиционным алгоритмом, приведенным в [6]. Коэффициенты первого столбца табл. 6.4 имеют разные знаки, поэтому не все корни находятся в левой полуплоскости и система является неустойчивой. Наличие двух переменных знаков коэффициентов первого столбца означает, что характеристический полином имеет два корня справа от мнимой оси.

Для дискретных систем имеется аналогичный непрерывный критерий Шур - Кона для уравнения

$$a_0 z^n + a_1 z^{n-1} + \dots + a_n = 0, |z| \leq 1,$$

где $z = e^{pT}$; T_0 - такт дискретности; p - оператор Лапласа.

Оценка с помощью этого критерия «на прямую» при большом n весьма громоздка. Если воспользоваться обратным преобразованием $z = (1+\lambda)/(1-\lambda)$, то круг $|z| \leq 1$ отображается на область $\text{Re}(\lambda) \leq 0$, что позволяет применить тот же критерий Рауса. Однако предварительное преобразование неходного характеристического уравнения после замены $z = (1+\lambda)/(1-\lambda)$ приводит к дополнительным пересчетам коэффициентов a_k в новые коэффициенты b_j :

$$b_j = \sum_{k=0}^n a_k \left[\binom{n-k}{j} - \binom{k}{1} \binom{n-k}{j-1} + \binom{k}{2} \binom{n-k}{j-2} + \dots + (-1)^j \binom{k}{j} \right],$$

$$\text{где } \binom{k}{j} = \frac{k!}{j!(k-j)!}.$$

Практика расчетов устойчивости САУ подтвердила преимущества алгоритма, представленного в табл. 6.3. Однако по-прежнему вычислительные погрешности становятся существенными при $n > 10$.

2. Частотные методы. В решении задач анализа устойчивости и качества САУ широко применяются методы частотных характеристик (ЧХ), так как по ЧХ проектировщик может судить о таких важнейших характеристиках САУ, как запасы устойчивости по амплитуде и по фазе, резонансная частота, колебательность и т. д. Реализация их на ЭВМ требует переделки и видоизменения исходных алгоритмов применительно к машинной специфике. Практическое значение частотных методов исследования систем автоматического управления заключается в их наглядности и возможности сопоставления экспериментальных и расчетных данных.

Несмотря на значительное число предложенных алгоритмов расчета ЧХ на ЭВМ, их построение для характерных в промышленных САУ неминимально-фазовых звеньев с резко выраженными резонансными свойствами наталкивается на значительные трудности. Минимально-фазовые системы обладают однозначным соответствием амплитудной и фазовой ЧХ, а неминимально-фазовые таким свойством не обладают. Так, звено с передаточной функцией $1/(1-Tr)$ имеет фазовую характеристику

Таблица 6.4. Расчет таблицы Рауса для примера 6.2

Коэффициент R	Номер строки	Номер столбца			
		1	2	3	4
$1R = 1/6 = 0,167$	1	$A(1) = 1$	$A(3) = 21$	$A(5) = 62$	$A(7) = 100$
$1R = 6/13,65 = 0,44$	2	$A(2) = 6$	$A(4) = 44$	$A(6) = 52$	
$1R = 13,65/20,5 = 0,66$	3	$11A(2) = 66$	$11A(4) = 286$	$11A(6) = 572$	
$1R = 20,5/48 = 0,43$	4	$XA(4) = 44 - 0,44 \times 53,3 = 20,6$	$X2A(6) = 52 - 0,44 \times 100 = -8$		
$1R = 48/(1-35) = -1,37$	5	$XA(6) = 8 - 0,43 \times 100 = -35$			
	6				
	7				

$$\varphi = -\arctg \frac{T_{10}}{-1} = -(180^\circ - \arctg T_{10}),$$

тогда как обычное аperiodическое звено $1/(1+Tp)$ имеет характеристику $\varphi = -\arctg T\omega$. (Здесь в дальнейшем p — оператор Лапласа. При нулевых начальных условиях $p = d/dt$, как и в уравнениях (3.16).) Резонансные звенья

$$\frac{1 + \xi_1 T_1 p + T_1^2 p^2}{1 + \xi_2 T_2 p + T_2^2 p^2}$$

при $\xi_1, \xi_2 \rightarrow 0$ становятся «усилителями» входных сигналов, «входят в резонанс» на частотах, близких к $1/T_1, 1/T_2$.

Наличие резонансных пиков на амплитудной ЧХ (АЧХ), скачков фазы на фазочастотных характеристиках (ФЧХ) требует проведения неоднократных «ручных» изменений шага по частоте ω в процессе вычислений с целью отслеживания резких изменений. Определенные трудности имеются и при вычислении истинных значений ФЧХ, которые обусловлены тем, что аргумент комплексного числа определен только с точностью до чисел вида $2k\pi$, где k — целое число.

Рассмотрим возможности вычисления на ЭВМ ЧХ и укажем на особенности и основные трудности, возникающие при решении этой задачи. В качестве исходных примем уравнения движения САУ в форме (3.15). Тогда под ЧХ (3.15) по выходной координате $y_s \in Y$ по отношению к входному воздействию $x_r \in X$ следует понимать вынужденную составляющую y_s решения дифференциальных уравнений (3.15) при $z_0 = 0$, $x_r = \sin \omega t$, $y_s = A_{sr}(\omega) \cdot \sin[\omega t + \varphi_{sr}(\omega)]$. Составляющая y_s определяется при дискретных значениях частоты ω , задаваемой в диапазоне $\omega_{\min} \leq \omega \leq \omega_{\max}$. Полученные при этом зависимости $L_{sr}(\omega)$, $\varphi_{sr}(\omega)$ представляют собой ЧХ системы для пары $y_s, x_r \in Y, X$.

Аналогично можно получить ЧХ для пар $y_s, u_r \in Y, U$; $u_s, x_r \in U, X$; $y_s, u_r \in Y, U$, составляя соответствующие отношения амплитуд в фаз y_s, u_r ; u_s, x_r ; y_s, u_r при одном и том же задаваемом возмущении $x_r = \sin \omega t$.

Для построения ЧХ по системе уравнений (3.15) обычно строят передаточные матрицы, осуществляя преобразования Лапласа по отношению к функциям времени $\dot{Z}(t)$, $Z(t)$, $U(t)$, $X(t)$, $Y(t)$ при нулевых начальных условиях.

Прodelав это для (3.15) и выражая $Y(p)$ через $X(p)$ при $Z_0 = 0$, $C = E$, $U = 0$, найдем

$$Y(p) = [pE - A]^{-1}DX(p),$$

откуда

$$W_{Y,X}(p) = [pE - A]^{-1}D.$$

Аналогично при $X = 0$, $U \neq 0$ найдем

$$W_{Y,U}(p) = [pE - A]^{-1}B. \quad (6.7)$$

В том случае, когда задана структура регулятора, связь U с X устанавливается из соотношения

$$W_{U,X}(p) = [pE - V]^{-1}K, \quad (6.8)$$

откуда находим передаточную функцию разомкнутой системы:

$$W_{Y,U}(p) = W_{Y,X}(p) \cdot W_{U,X}(p). \quad (6.9)$$

Соответственно матричная передаточная функция замкнутой единичной отрицательной (главной) обратной связи системы будет

$$W_{\text{зам}}(p) = [E + W_{Y,U}(p)]^{-1}W_{Y,U}(p). \quad (6.10)$$

Из матричных соотношений (6.7) — (6.10) можно получить частные передаточные функции, связывающие отдельные составляющие векторов Y, U, X между собой.

Для построения ЧХ разомкнутой САУ по передаточной матрице $W_{Y,U}(p)$ строятся ЧХ для различных значений ω из заданного диапазона $\omega \in [\omega_{\min}, \omega_{\max}]$ соответствующих элементов $W_{Y,U}(p)$:

$$|W_{k,s}(j\omega)| = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad k = \overline{1, n}, \quad s = \overline{1, n}, \quad k \neq s,$$

где $P = \text{Re}\{W_{k,s}(j\omega)\}$; $Q = \text{Im}\{W_{k,s}(j\omega)\}$.

Факт устойчивости или неустойчивости устанавливается по подсчету точек пересечения фазовой характеристики линий $\varphi_0 = -\pi$ слева от частоты среза $|W_{k,s}(j\omega)| = 1$. Машинная ориентация этого метода оценки устойчивости состоит в алгоритмизации вычислительной процедуры построения графиков $|W(j\omega)|$, $\varphi(\omega)$.

Рассмотрим один из алгоритмов построения ЧХ. Исходную передаточную функцию $W_{h,s}$ представляют в виде типовых соединений стандартных звеньев с передаточными функциями вида

$$W_l(p) = \frac{a_l p^2 + b_l p + c_l}{a_l p^2 + b_l p + c_l} e^{-p\tau_l}, \quad (6.11)$$

для которых выражения $|W_l(\omega)|$, $\varphi_l(\omega)$ имеют известный канонизированный вид. Передаточная функция $e^{-p\tau_l}$ определяет звено с запаздыванием, которое воспроизводит входной сигнал без искажений, но с постоянным запаздыванием по времени на величину τ_l . Такие звенья встречаются в САУ ЛА, ТГ, ГСП, ШР и других для отображения передачи сигналов через дискретные элементы или аппроксимации запаздывания в гидравлических, пневматических и электромагнитных цепях.

Из (6.11) можно получить другие элементарные звенья как частный случай, полагая соответствующие коэффициенты a_l, b_l, c_l, τ_l равными нулю. На ЭВМ рассчитываются количества $|W_l|$

и φ_i , $i = \overline{1, N}$, по стандартным программам, составленным в соответствии с выражениями

$$\left. \begin{aligned} L_i &= |W_i(j\omega)| = \frac{\gamma_i}{c_i} \frac{\sqrt{(1 - a_i'^2\omega^2)^2 + (\beta_i'\omega)^2}}{\sqrt{(1 - a_i''\omega^2)^2 + (\beta_i''\omega)^2}}; \\ \varphi_i(\omega) &= \arctg \frac{\beta_i'\omega}{1 - a_i'\omega^2} - \arctg \frac{\beta_i''\omega}{1 - a_i''\omega^2}; \\ a_i' &= \frac{a_i}{\gamma_i}; \beta_i' = \frac{\beta_i}{\gamma_i}; a_i'' = \frac{a_i}{c_i}; \beta_i'' = \frac{\beta_i}{c_i}. \end{aligned} \right\} \quad (6.12)$$

Используя правила разложения полиномов в $W_{k,s}(p)$ на множители $a_i p^2 + \beta_i p + \gamma_i$; $a_i p + b_i p + c_i$, исходную передаточную функцию приводя к произведению функций вида (6.11). Тогда логарифмическая АЧХ разомкнутой передаточной функции $W_{k,s}(p)$ будет иметь вид

$$L(\omega) = 20 \lg |W_{k,s}(j\omega)| = \sum_{i=1}^N L_i(\omega), \quad (6.13)$$

а ФЧХ — вид

$$\varphi(\omega) = \sum_{i=1}^N \varphi_i(\omega).$$

Такой алгоритм позволяет составить достаточно компактную программу вычислений ЧХ, выполняемую в цикле по числу звеньев, $i = \overline{1, N}$, из процедур, реализующих формулы (6.12), (6.13).

Остановимся на некоторых особенностях построения ЧХ на ЭВМ по приведенной методике. При реализации (6.13) для углов $\varphi_i \approx \pi/2$ значения аргументов в (6.13) стремятся к ∞ , что исключает расчет таких точек на ЭВМ. Поэтому $\arctg(\dots)$ в (6.12) следует заменить на выражения

$$\varphi_i = \arccos \frac{\operatorname{Re}\{W_i(j\omega)\}}{|W_i(j\omega)|} \quad (6.14)$$

или

$$\varphi_i = \arcsin \frac{\operatorname{Im}\{W_i(j\omega)\}}{|W_i(j\omega)|}, \quad (6.15)$$

которые не имеют указанных особенностей.

Как известно, в общем случае при построении фазовой характеристики для звеньев $W_i(p)$ может быть скачок фазы при следующих сочетаниях коэффициентов b_i , β_i :

$$b_i = 0; \beta_i \neq 0; b_i \neq 0; \beta_i = 0; b_i = \beta_i = 0.$$

В связи с этим программа вычисления фазы должна строиться с учетом возможных скачков функции $\varphi(\omega)$.

Если $\beta_i \neq 0$, $b_i \neq 0$, т. е. система демпфированная, то $\varphi(\omega)$ — непрерывная функция и скачка фазы не будет.

В любом из указанных «опасных» сочетаний коэффициентов следует проверить, попадает ли

$$\omega_{1i} = \sqrt{\frac{\gamma_i}{a_i}}; \omega_{2i} = \sqrt{\frac{c_i}{a_i}} \quad (6.16)$$

в интервал изменения частоты $[\omega_k, \omega_{k+1}]$. Если $\omega_{1i} \in [\omega_k, \omega_{k+1}]$, $i = 1, 2$, то функция в этом интервале терпит разрыв и фаза меняется скачком на величину $\pm \pi$. Тогда, в частности, к значению $\varphi(\omega_k)$ на этом интервале следует добавить $\pm \pi$, где конкретный знак определяется по сочетаниям знаков

$$\operatorname{Re}\{W_i\}, \operatorname{Im}\{W_i\}.$$

Шаг по ω_k при этом следует выбрать из условия

$$\Delta\omega_k < \Delta\omega_{1i}.$$

В том случае, когда передаточную функцию $W_{k,s}(p)$ не удается представить в виде набора функций $W_i(p)$ и возникают особенности в $W_{k,s}(p)$ из-за наличия неминимально-фазовых и резонансных звеньев, приходится строить алгоритм вычисления ЧХ для общего случая представления $W_{k,s}(p)$ в виде

$$W(p) = \frac{\sum_{i=0}^m A_i^k p^i}{\sum_{i=0}^n B_i^k p^i}, \quad n > m. \quad (6.17)$$

Для построения ЧХ системы (6.17) делаем подстановку $p = j\omega$:

$$W(j\omega) = \frac{\sum_{i=0}^m A_i^k \omega^i}{\sum_{i=0}^n B_i^k \omega^i},$$

где A_i^k и B_i^k — комплексные коэффициенты, определяемые следующим образом:

$$A_i^k(B_i^k) = \begin{cases} A_i^k(B_i^k) + j0 & \text{при } i = 2n, n = 0, 2, 4, \dots; \\ -A_i^k(-B_i^k) + j0 & \text{при } i = 2n, n = 1, 3, 5, \dots; \\ 0 + jA_i^k(jB_i^k) & \text{при } i = 2n + 1, n = 0, 2, 4, \dots; \\ 0 - jA_i^k(-jB_i^k) & \text{при } i = 2n + 1, n = 1, 3, 5, \dots \end{cases} \quad (6.18)$$

Исходной информацией для расчета по-прежнему являются массивы A_i^k и B_i^k , границы диапазона частот $\omega_{min} \leq \omega \leq \omega_{max}$, в котором требуется построить ЧХ. Определение необходимых для построения ЧХ значений $|W(j\omega)|$, $\text{Re}[W(j\omega)]$, $\text{Im}[W(j\omega)]$ может производиться средствами комплексной арифметики, входящей в математическое обеспечение ЭВМ без предварительного определения их аналитических выражений. Если по каким-либо причинам применение стандартных средств комплексной арифметики нежелательно, то расчет ЧХ производится следующим образом [14, 17]. Вычисление значений вещественной и мнимой ЧХ осуществляется по выражениям

$$\begin{aligned} \text{Re}[W(j\omega)] &= (RB \times RA - JB \times JA) / (RB^2 + JB^2); \\ \text{Im}[W(j\omega)] &= (RB \times JA - JB \times RA) / (RB^2 + JB^2), \end{aligned}$$

где RA , RB — вещественные части, а JA , JB — мнимые части полиномов числителя и знаменателя в (6.17) на частоте ω . Для определения значений полиномов лучше всего приспособлена схема Горнера, позволяющая во многих случаях избежать ситуаций переполнения и исчезновения порядка, поэтому вещественные и мнимые части полиномов вычисляются по рекуррентным соотношениям, полученным на ее основе:

$$\begin{aligned} RB_0 &= B_n, \quad JB_0 = 0; \\ RB_i &= JB_{i-1} \omega + B_{n-i}; \\ JB_i &= RB_{i-1} \omega, \quad i = 1, \dots, n; \\ RB &= RB_n, \quad JB = JB_n. \end{aligned} \quad (6.19)$$

Значение АЧХ находится по формуле

$$|W(j\omega)| = \sqrt{\text{Re}_n^2 + \text{Im}_n^2}, \quad (6.20)$$

где

$$\begin{aligned} \text{RJM} &= \max\{|\text{Re}[W(j\omega)|], |\text{Im}[W(j\omega)|]\}; \\ \text{Re}_n &= \text{Re}[W(j\omega)] / \text{RJM}; \quad \text{Im}_n = \text{Im}[W(j\omega)] / \text{RJM}, \end{aligned}$$

а логарифмической АЧХ — по формуле

$$L(\omega) = -20 \lg |W(j\omega)|. \quad (6.21)$$

Для того чтобы не пропустить возможные резонансные пики в (6.17), необходимо соответственно изменять шаг $\Delta\omega_k$ построения ЧХ [3, 13].

При построении ЧХ целесообразно выводить на печать значения функций $L(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ не при всех ω_k ($k=0, M$). Например, запас устойчивости по амплитуде определяется величиной $L(\omega)$ при

таких значениях $\omega = \omega_0$, когда фазовая характеристика

$$\varphi(\omega) = -\pi. \quad (6.22)$$

Следовательно, нужно найти корень ω_0 уравнения (6.22) и при этом значении корня вычислить значение амплитудной характеристики.

Такой подход позволяет выводить на печать только интересующие проектировщика параметры: запасы устойчивости по амплитуде и фазе, резонансную частоту, частоту среза и т. д.

3. Корневые методы оценки устойчивости. Оценка устойчивости линейной САУ может быть выполнена на основе анализа корней характеристического уравнения (6.1) в предположении, что уравнение уже получено одним из приведенных в п. 1 способов.

Из существующих методов вычисления корней характеристического уравнения, реализованных в программном обеспечении ЦВМ, достаточно приемлемыми при анализе САУ оказались методы Рунтсхаузера и Хичкока [2].

Алгоритм Хичкока решения уравнения (6.1) любой степени строится следующим образом. Перепишем уравнение (6.1) в виде $a_1 \lambda^n + a_2 \lambda^{n-1} + \dots + a_{n+1} = 0$, где a_i — вещественные числа, а n — любое целое число. Алгоритм заключается в следующем: задавшись начальными приближениями p_0 и q_0 , проводим следующие операции:

$$\frac{a_1 \lambda^n + a_2 \lambda^{n-1} + \dots + a_{r+1}}{\lambda^2 + p \lambda + q} = b_1 \lambda^{n-2} + b_2 \lambda^{n-3} + \dots + b_{n-1} + \frac{c \lambda + d}{\lambda^2 + p \lambda + q},$$

откуда

$$\begin{aligned} b_1 &= a_1, \quad b_2 = a_2 - p b_1; \quad b_i = a_i - p b_{i-1} - q b_{i-2} \quad (i=3, \dots, n-1); \\ c &= a_n - p b_{n-1} - q b_{n-2}; \quad d = a_{n+1} - q b_{n-1}. \end{aligned}$$

При верных p и q должно быть $c, d \approx 0$. Начальные приближения p и q ищутся, например, с помощью программы псевдослучайных точек, равномерно распределенных в единичном многомерном гиперкубе. Оценка изменения p и q определяется следующим образом:

$$a_1 + \max(|a_i|) = A; \quad |p| \leq 2A; \quad |q| \leq A^2. \quad (6.23)$$

В дальнейшем строится итерационный процесс $p^{k+1} = p^k + \Delta p$, $q^{k+1} = q^k + \Delta q$. Для рассмотренного и других алгоритмов решения уравнения (6.1) существует сильная чувствительность точности вычислений к изменению коэффициентов уравнения (6.1). Так, для уравнения

$$\lambda^4 - 4\lambda^3 + (6 - 49 \cdot 10^{-6})\lambda^2 - 4\lambda + 1 = 0$$

корни имеют значения $\lambda_1 = 1,02681$; $\lambda_2 = 0,97389$; $\lambda_{3,4} = 0,99976 \pm$

$\pm j0,02645$, тогда как пренебрежение величиной $49 \cdot 10^{-8}$ сразу приводит к очевидному результату $\lambda_{1,2,3,4} = 1$.

Особые трудности возникают при вычислении близких по модулю корней. В этом случае иногда оказывается полезным «изменить» характеристическое уравнение. Например, для уравнения

$$\lambda^5 - 5\lambda^4 - 9\lambda^3 + 5\lambda - 1 = 0,$$

где $\lambda_1 = 2,6180$; $\lambda_2 = 0,3820$; $\lambda_3 = -1,000$, $\lambda_{4,5} = 0,5 \pm j0,8656$, требуется 15 тыс. итераций, чтобы найти эти корни [2].

Если же сделать замену $\lambda = \lambda^* + 1$, то корни уравнения

$$\lambda^{*5} - \lambda^{*4} - 2\lambda^{*3} - \lambda^* = 0.$$

$\lambda_1^* = 0$, $\lambda_2^* = 1,6180$, $\lambda_3^* = -0,6180$, $\lambda_{4,5}^* = -0,5 \pm j0,8656$ отыскиваются за несколько итераций.

После нахождения корней λ_i оценка устойчивости производится по значениям $\text{Re}(\lambda_i)$. Более детальный анализ устойчивости системы можно сделать путем построения корневых годографов. Для этого строят на ЦВМ зависимости

$$\text{Re}(\lambda_i) = f_1(a_0, a_1, a_2, \dots, a_n);$$

$$\text{Im}(\lambda_i) = f_2(a_0, a_1, a_2, \dots, a_n).$$

Реализуя эти зависимости численно на ЦВМ, для каждого набора коэффициентов $a_0^i, a_1^i, a_2^i, \dots, a_n^i$, $i = \overline{1, M}$, вычисляют значения корней, например, методом Хэнкока и изучают изменение устойчивости по миграции корней на плоскости $\text{Re}(\lambda_i)$; $\text{Im}(\lambda_i)$.

Машинная ориентация методов оценки качества и точности. Традиционные методы оценки качества и точности САУ делятся на временные, частотные и корневые.

1. Временные оценки качества. Эти оценки на практике осуществляются численными методами, при этом по исходной ММ САУ строят численный переходный процесс в ней, по которому и делятся нужные оценки. При машинной ориентации численных методов преимущества ЭВМ становятся особенно очевидными, причем в этом случае уже нет необходимости в предварительной линеаризации исходной системы. Временные процессы строятся методами, изложенными в гл. 5, однако при анализе помимо воспроизведения процессов, необходимо оценивать по ним характеристики качества и точности. Для этого дополнительно к методам численного интегрирования, добавляются методы обработки детерминированных и стохастических процессов, получаемых на ЭВМ. При оценке качества САУ удобно применение интегральных оценок

$$\left. \begin{aligned} J_1 &= \int_0^\infty y_i^2(t) dt, \quad i = \overline{1, n}; \\ J_2 &= \int_0^\infty (y_i^2 + k_1 y_i^2) dt; \\ &\dots \dots \dots \\ J_N &= \int_0^\infty (y_i^2 + k_1 y_i^2 + \dots + k_N y_i^{(N)}) dt, \end{aligned} \right\} \quad (6.24)$$

предложенных А. А. Фельдбаумом (советский ученый в области САУ, 1913—1969).

Применяют также алгоритмы таких оценок на основе метода наименьших квадратов. Один из таких алгоритмов * положен в основу комплекса программ «обработки» подсистемы «Анализ» САПР САУ. Во многих случаях вид временного ряда, полученного в результате численного решения системы (3.10), напоминает решение системы линейных дифференциальных уравнений. Обработку временных рядов такого рода можно свести к задаче аппроксимации заданных отсчетов функций $y_k(t) \in Y$, $k = \overline{1, N}$, функциями вида

$$y(t_k) = \sum_{m=1}^M a_m e^{-\eta_m t_k} \sin(\omega_m t_k + \varphi_m). \quad (6.25)$$

Дискретным аналогом этих функций является функция дискретного времени $t_k = \Delta t \cdot k$. Полагая $\Delta t_k = 1$, можно записать

$$\bar{y}_k = \sum_{m=1}^M b_m z_m^k, \quad k = \overline{0, N-1}; \quad b_m = a_m e^{-\eta_m}; \quad z_m^k = \sin(\omega_m k + \varphi_m).$$

Образует функционал

$$J(a_m, \eta_m, \omega_m, \varphi_m, M) = \min \left\{ \sum_{k=1}^M |y_k - \sum b_m z_m^k|^2 \right\}. \quad (6.26)$$

Найденные в результате минимизации этого функционала характеристики процессов $S = (a, \eta, \omega, \varphi, M)$ позволяют осуществить подробный анализ исследуемой САУ. Значительно сложнее обработка случайных процессов, которая при анализе САУ становится необходимой в связи со спецификой их применения.

В большинстве случаев используют алгоритмы, разработанные для стационарных и эргодических случайных процессов. Существо

* Кей С. М., Марпл С. Л. Современные методы спектрального анализа // Обзор. ТИИЭР. 1981. Т. 69. № 11.

этих алгоритмов сводится к оценке математического ожидания случайного процесса $X(t)$, $-M[X(t)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_0^T X(t) dt$, корреляционной функции

$$R_{XX}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T X(t) X(t + \tau) dt \quad (6.27)$$

и взаимно корреляционной функции случайных процессов $X(t)$ и $Y(t)$

$$R_{XY}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T X(t) Y(t + \tau) dt. \quad (6.28)$$

Преобразованием Фурье функции (6.27), (6.28) обычно приводят к частотным характеристикам случайных процессов — спектральной и взаимно спектральной плотностям

$$S_{XX}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{XX}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau; \quad (6.29)$$

$$S_{XY}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{XY}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau. \quad (6.30)$$

Характеристиками (6.29), (6.30) удобно пользоваться при расчете линейных САУ.

Многочисленные устройства по аппаратурной реализации формул (6.26) — (6.30) основаны лишь на оценках соответствующих статистических характеристик, достоверность, состоятельность, несмещенность и эффективность которых зависят от длины реализации T .

При реализации на ЭВМ соответствующие разностные алгоритмы имеют вид

$$\left. \begin{aligned} R_{XX}^{**}(m) &= \frac{1}{N-m+1} \sum_{n=1}^{N-m} X(n) X(n+m); \\ R_{XY}^{**}(m) &= \frac{1}{N-m+1} \sum_{n=1}^{N-m} Y(n) X(n+m); \end{aligned} \right\} \quad (6.31)$$

где N — количество дискретных ординат реализации; n, m — дискретные аргументы корреляционной функции при единичном такте дискретности.

С целью сокращения «расходов памяти» при вычислениях применяются рекуррентные формулы для расчета $R_{XX}(m)$, $R_{XY}(m)$:

$$\left. \begin{aligned} R_{XX}^{**}(m) &= \frac{n-m}{n-m+1} R_{XX}^{**}(m-1) + \frac{1}{n-m+1} X(n) X(n+m); \\ R_{XY}^{**}(m) &= \frac{n-m}{n-m+1} R_{XY}^{**}(m-1) + \frac{1}{n-m+1} X(n) Y(n+m). \end{aligned} \right\} \quad (6.32)$$

Практика статистического оценивания случайных процессов сформировала значительное количество эмпирических рекомендаций, которые позволяют выбирать время реализации, дисперсию выборки, память фильтра для обеспечения достоверности оценок статистических характеристик. Однако при оценках статистических характеристик сигналов в САУ непосредственное использование этих алгоритмов может привести к большим погрешностям, поскольку одной из важных особенностей САУ является нестационарность возмущающих воздействий и некоторых из параметров состояния САУ. В этом случае не выполняются гипотезы «продуктивности». Вычислительные алгоритмы статистической обработки сигналов для стационарного и нестационарного случайных процессов по одной реализации, по нескольким реализациям и по массиву реализаций при анализе САУ строятся аналогично (6.31), (6.32) [15].

2. Частотные и корневые оценки качества. Эти оценки строятся на основе алгоритмов (6.11) — (6.21), (6.23), рассмотренных при анализе устойчивости. С помощью ЛФЧХ и корневых годографов, построенных на ЭВМ, можно определить характеристики качества процессов в САУ. ЧХ дают достаточно подробную информацию о качестве САУ. Однако в отличие от временных частотными методами обычно исследуются линейные системы в формах (3.15) — (3.17).

§ 6.2. Машинные методы анализа

Применение ЭВМ для изоморфной реализации перечисленных и многих других методов, широко распространенных при «ручных» расчетах, является малоэффективным, поскольку при этом сохраняются все ограничения, присущие теоретическим методам, и не используются широкие возможности ЭВМ. Анализ состояния вопроса по разработке второй и третьей групп специально машинных методов — показывает, что их разработка значительно отстает от роста парка и технических возможностей ЭВМ. Разработка теории и практики специальных машинных методов, в полной мере использующих возможности ЭВМ, является новой, чрезвычайно широкой областью исследования.

Специально машинные методы анализа устойчивости линейных стационарных систем базируются на математическом аппарате, исключая достижимое построение характеристического уравнения. В этом случае достигаются экономичность и удобство вычислительной процедуры, где отсутствуют неизбежные ошибки округления и от вы-

рождения промежуточных определителей при разворачивании определителя исходной матрицы. Применение этих методов для оценок устойчивости «вручную» практически неэффективно.

Общий принцип матричной оценки устойчивости предложен В. И. Зубовым. Алгоритм оценки устойчивости в соответствии с этим принципом сводится к следующему. Пусть однородная система дифференциальных уравнений имеет вид

$$\dot{Y} = AY, \quad Y(0) = Y_0, \quad (6.33)$$

где Y — n -мерный вектор; A — матрица $n \times n$; n — порядок системы дифференциальных уравнений.

Как известно, для устойчивости системы (6.33) необходимо и достаточно, чтобы все корни λ характеристического уравнения

$$|\lambda E - A| = 0 \quad (6.34)$$

удовлетворяли условию $\operatorname{Re} \lambda < 0$. Используя известное дробно-линейное преобразование $\lambda \rightarrow (\rho + 1)/(\rho - 1)$, уравнение (6.34) приводят к виду

$$|(A - E)^{-1}(A + E) - \rho E| = 0. \quad (6.35)$$

Обозначив в (6.35) $(A - E)^{-1}(A + E) = B$, получим

$$|\rho E - B| = 0. \quad (6.36)$$

Уравнение (6.36) по структуре совпадает с (6.34), но для устойчивости исходной системы (6.33) необходимо и достаточно выполнение неравенства $|\rho_i| < 1$, $i = \overline{1, n}$. Так как по известной теореме высшей алгебры для того, чтобы $B^k \rightarrow 0$, необходимо и достаточно, чтобы $|\rho_i| < 1$, то для оценки устойчивости требуется убедиться в выполнении условия $B^k \rightarrow 0$ при $k \rightarrow \infty$, где

$$B = (A - E)^{-1}(A + E) = E + 2(A - E)^{-1}. \quad (6.37)$$

Поскольку имеет место неравенство

$$|B^k| \leq |B|^k, \quad (6.38)$$

оценку (6.37) можно проводить по любой из норм:

$$\|B\| = \max_{j=1}^n \sum_{i=1}^n |b_{ij}|, \quad (6.39)$$

$$\|B\| = \max_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |b_{ij}|, \quad (6.40)$$

$$\|B\| = \sqrt{\sum_{j=1}^n b_{ij}^2}. \quad (6.41)$$

На основе предложенного В. И. Зубовым критерия строятся различные матричные алгоритмы анализа качества линейных систем [1].

Применение оценок (6.37) к анализу устойчивости САУ в ряде случаев оказалось затруднительным из-за быстрого истощения ресурсов ЭВМ при перемножении матриц B большой размерности.

Для анализа САУ по переменным состояниям (3.15) весьма эффективно моделирование на АВМ и ЦВМ на основе принципа параллельного воспроизведения нескольких ММ САУ (см. § 5.4). Действительно, в этом случае оказывается возможным одновременно и по заданному алгоритму анализировать парциальные составляющие по любой интересующей исследователя обобщенной координате. Существенным достоинством такого анализа является возможность наблюдать и измерять переменные состояния нелинейных САУ, скрытые от наблюдателя (промежуточные сигналы в цепях САУ, возмущающие механические моменты, перемещения упругих элементов и др.); анализировать влияние изменения параметров САУ на их временные характеристики. Так, для анализа качества сложной линейной системы вместо машинно-ориентированных методов можно применить системный метод анализа парциальных составляющих, суть которого заключается в следующем. Представим исходную систему (3.10) в виде

$$\dot{Y} = AY + X(t), \quad Y(t_0) = Y_0. \quad (6.42)$$

Воспроизведем на ЭВМ параллельно системы (6.42) для каждой из составляющих $X(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)\}$, строим матрицу парциальных составляющих $y_{ij}(t)$, $j = \overline{1, n}$, для каждого $x_i(t)$.

По парциальным составляющим y_{ij} можно провести более глубокий анализ исходной системы, чем классическими методами с известным разделением на устойчивость, качество, точность. В дальнейшем, исследуя выходные координаты $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$ при различных возмущениях, получаем исчерпывающую информацию о поведении системы.

К машинным методам с достаточно хорошо отработанными вычислительными алгоритмами относятся методы численного анализа стохастических систем (3.7). Случайные функции, входящие в описание исходной системы, воспроизводятся по их вероятностным характеристикам. Для каждой выборки случайных значений интегрируется исходная система уравнений, причем такое интегрирование производится многократно. Наиболее простую схему имеют алгоритмы, построенные на основе метода Монте-Карло. Этот метод был предложен в конце 40-х годов американскими математиками Дж. Нейманом и С. Уламом. Само название «Монте-Карло» происходит от города Монте-Карло, знаменитого своими игорными домами. По существу, метод Монте-Карло — это числен-

ный метод решения математических задач путем имитации случайных величин. Применительно к ММ САУ (5.32), полученной после приведения (3.7) к виду, удобному для моделирования, схеме метода Монте Карло можно представить следующим образом. В исходной системе (5.7)

$$F(\ddot{z}, \dot{z}, z, p, t) = 0, \quad (6.43)$$

будем считать, что $\mu^k = [\mu_1^k, \dots, \mu_m^k]$ заданные случайные величины, определяемые случайными отклонениями начальных условий и параметров. Выборки значений случайных величин μ^k задаются с помощью специальных программ для ЦВМ.

Кроме того, задаются функции $\Phi(S_k)$, определяющие форму вероятностных характеристик некоторых функционалов от выходных координат САУ (математические ожидания, дисперсия, законы распределения вероятности нахождения функций от $z(t)$ в заданных пределах и т. д.).

Для каждого варианта k значений случайных величин μ^k осуществляется решение уравнений (6.43) на ЭВМ. Рассчитываются функции $\Phi(S_k)$ в соответствии с интересующими исследователя характеристиками выходных сигналов. Точность статистических оценок по методу Монте-Карло возрастает при увеличении числа N в соответствии с законом «больших чисел».

В соответствии с известными оценками [13] оказывается, что вероятность обеспечения заданной точности метода Монте-Карло $\delta_N \leq \varepsilon$

$$P\{\delta_N \leq \varepsilon\} \sim \Phi(3\varepsilon/\sqrt{N/2}), \quad (6.44)$$

где

$$\Phi = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (6.45)$$

есть функция Лапласа.

Если удовлетвориться вероятностью $P=0,99$, то из (6.44) получается простая зависимость

$$N \approx 1/\varepsilon^2.$$

Метод Монте-Карло наиболее эффективно реализуется на аналого-цифровом комплексе САПР САУ по принципиальной схеме, представленной на рис. 6.4. Благодаря возможностям АЧМ решать с частотой от 50 до 100 Гц сложные нелинейные дифференциальные уравнения на АЦК принципиально возможно проводить достаточно полный анализ САУ с высокой достоверностью.

Применение указанных методов для анализа САУ по полному ММ только на ЦВМ становится практически эффективным при использовании системных методов численного интегрирования (5.52).

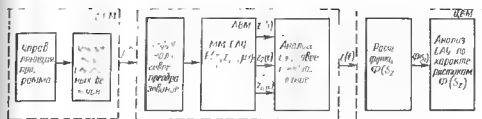


Рис. 6.4. Схема реализации метода Монте-Карло на АЦК

Частотный анализ можно строить на основе решения задачи Коши. Рассмотрим методы построения ЧХ путем непосредственного вычисления вынужденной составляющей уравнений (3.15) при подаче на вход сигнала $x_r = \sin \omega t$ ($x_r \in x$). С точки зрения реализации на ЭВМ такие методы представляются достаточно экономичными и удобными, поскольку исключается необходимость вычисления функции комплексной переменной, перехода от исходной ММ, записанной, например, в форме (3.15), к передаточным матрицам (6.7)–(6.10), и дополнительных операций из-за учета резонансных и неминимально-фазовых свойств реальных систем.

Применяя методы аналитических преобразований на ЦВМ (см. § 4.3) и системные методы численного интегрирования, можно упростить и ускорить получение ЧХ системы между любыми точками ее структуры как для замкнутых, так и для разомкнутых контуров, а также распространить построение ЧХ для приближенной оценки частотных свойств нелинейных систем. Поясним основную идею такого построения ЧХ на системе с одной степенью свободы. Как известно, вынужденная составляющая решения уравнения такой системы

$$\ddot{y} + 2\zeta\dot{y} + \omega_0 y = \sin \omega t \quad (6.46)$$

имеет вид

$$y_{\text{ст}} = \frac{1}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta^2\omega^2}} \sin\left(\omega t + \arctg \frac{2\zeta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}\right) = L(\omega) \sin[\omega t + \varphi(\omega)]. \quad (6.47)$$

Таким образом, АЧХ $L(\omega)$ и ФЧХ $\varphi(\omega)$ получаются как результаты решения уравнения (6.46) для различных значений ω из заданного диапазона $\omega_{\text{min}} \leq \omega \leq \omega_{\text{max}}$, причем $L(\omega)$, $\varphi(\omega)$ можно строить как путем непосредственного счета по готовым аналитическим формулам (6.47), так и путем численных решений уравнения (6.46) для

$$\omega = \omega_{\text{min}} + \Delta\omega \cdot N, \quad N = 0, 1, 2, \dots, \frac{\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{min}}}{\Delta\omega}. \quad (6.48)$$

В общем случае системы с n степенями свободы исходные уравнения для построения ЧХ можно представить в виде

$$\sum_{j=1}^n (a_{jk}\ddot{y}_k + b_{jk}\dot{y}_k + c_{jk}y_k) - Q_j \sin \omega t, \quad j = \overline{1, n}, \quad (6.49)$$

где a_{jk} , b_{jk} , c_{jk} — постоянные коэффициенты; Q_j — амплитуды синусоидальных возмущающих воздействий на систему.

Предположим, что $Q_j = 0$ при $j = 1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, n$, $Q_i \neq 0$. Тогда вынужденная составляющая решения (6.49) ищется в виде

$$y_k = L_k(\omega) \sin[\omega t + \varphi_k(\omega)], \quad k = \overline{1, n}. \quad (6.50)$$

Задача состоит в нахождении L_k и φ_k после подстановки (6.50) в (6.49). Тогда при $Q_j = Q_i = 1$ получим

$$\sum_{k=1}^{n_1} [(-a_{1k}\omega^2 + c_{1k})L_k \sin(\omega t + \varphi_k) + b_{1k}\omega L_k \cos(\omega t + \varphi_k)] - \sin \omega t; \\ \dots \dots \dots (6.51)$$

$$\sum_{k=1}^{n_1} [(-a_{n_1 k}\omega^2 + c_{n_1 k})L_k \sin(\omega t + \varphi_k) + b_{n_1 k}\omega L_k \cos(\omega t + \varphi_k)] = 0.$$

Имеем систему из $2n$ уравнений с $2n$ неизвестными.

Решение этой системы L_k , φ_k для каждого значения ω при изменении

$$\omega - \omega_{\min} + \Delta\omega_N \leq \omega_{\max}, \quad N = 0, 1, 2, \dots, \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\Delta\omega},$$

позволит получить ЧХ сразу по всем координатам y_k . Составляя отношения

$$L_{sr}(\omega) = \frac{L_s(\omega)}{L_r(\omega)} \quad (6.52)$$

и разности

$$\varphi_{sr}(\omega) = \varphi_s(\omega) - \varphi_r(\omega), \quad (6.53)$$

находим ЧХ связей между любыми двумя координатами системы (6.49). При этом входом является сигнал y_r , а выходом — сигнал y_s . Решение системы (6.49) средствами аналитических преобразований на ЭВМ позволяет сразу получить в аналитическом виде формулы для $L_{s,r}(\omega)$, $\varphi_{s,r}(\omega)$, а затем, считая по этим готовым аналитическим формулам, строить требуемые ЧХ численно.

Перейдем теперь к численному построению ЧХ во временной области. Пусть исходная система уравнений задана в форме (6.44).

В соответствии с общим видом решения (6.42) найдем

$$Y = e^{A(t-t_0)} Y_0 + \int_{t_0}^t e^{A(t-\tau)} X(\tau) d\tau, \quad (6.54)$$

Полагая $X(\tau) = (0, 0, \dots, \sin \omega_f \tau, 0, \dots, 0)$, можем записать общее

выражение для вынужденной составляющей вектора Y при воздействии j -й составляющей вектора X :

$$[Y_{\text{вын}}(t)]_j = \int_{t_0}^t (e^{A(t-\tau)})_j \sin \omega \tau d\tau, \quad (6.55)$$

где $(e^{A(t-\tau)})_j$ есть j -й столбец матрицы $e^{A(t-\tau)}$.

Полагая в (6.55) $t = kh$, $k = \overline{0, N}$, получим ее дискретный аналог

$$[Y_{\text{вын}}(kh)]_j = \int_{(k-1)h}^{kh} (e^{A(kh-\tau)})_j \sin \omega \tau d\tau. \quad (6.56)$$

Задаваясь значением шага $h \leq 0,1 \cdot 2\pi/\omega$, вычисляем интеграл в (6.56) по подходящей квадратурной формуле. Так, по формуле левых прямоугольников получим

$$[Y_{\text{вын}}(kh)]_j = h(e^{Akh})_j \sin[(k-1)h\omega]. \quad (6.57)$$

Вычисление матрицы e^{Ah} осуществляется по формуле (6.69). Продолжительность промежутка $0 < t \leq Nh$ на данной частоте в среднем равна $(3 \div 5) T$, где $T = 2\pi/\omega$.

Определение АЧХ (6.52) осуществляется после обработки s и r -й составляющих вектора $[Y_{\text{вын}}(kh)]_j$.

Для исключения возможных погрешностей целесообразно определить $L_{s,r}$ из отношения

$$L_{s,r}(\omega) = \frac{2L_s(\omega)}{2L_r(\omega)}, \quad (6.58)$$

а разность фаз — по формуле

$$\varphi_{s,r}(\omega) = -\frac{\Delta T}{T} 360^\circ, \quad (6.59)$$

где ΔT — отрезок времени между моментами пересечения, координатами $y_s^*(kh)$ и $y_r^*(kh)$, $y_s, y_r \in Y_{\text{вын}}$, оси колебаний в одном и том же направлении, т. е. при одном номере периода от начала процесса. Величины $L_s, \varphi_{s,r}, \Delta T$ определяются путем обработки y_s, y_r по нескольким периодам колебаний T .

При снятии ЧХ предварительно определяются приближенные значения $\omega_{\min}, \omega_{\max}, \omega_{\text{ср}}$, причем диапазон $\omega_{\max} \div \omega_{\min}$ выбирает-

ся в зависимости от целей дальнейшего использования ЧХ. Если это расчет регуляторов САУ, то интерес представляет ЧХ при фазовых сдвигах 90—270°; если это исследование динамики САУ вообще, то надо ориентироваться на диапазон частот, перекрывающих изменение фазы от 0 до 360°.

Распространение рассмотренного метода построения ЧХ на нелинейные системы основано на идее гармонической линеаризации нелинейности. В этом случае вместо (6.42) исходная нелинейная система задается в форме (3.10). Строится ЧХ по первой гармонике соответствующих составляющих вектора Y . Однако в этом случае уравнения (3.10) следует дополнить двумя скалярными уравнениями фильтров первой гармоники на частоте ω как для входа $[y_r(kh)]$, так и для выхода $[y_s(kh)]$ рассматриваемого участка структуры исследуемой САУ:

$$\ddot{y} + h\dot{y} + \Omega^2 y = y_r(t); \quad (6.60)$$

$$\ddot{y} + h\dot{y} + \Omega^2 y = y_s(t), \quad \Omega = \omega. \quad (6.61)$$

Принем в (3.10) по-прежнему $x_r = \sin \omega t$, $\omega_{\min} \leq \omega \leq \omega_{\max}$, $x_r \in X$.

§ 6.3. Машинно-аналитический метод анализа

Методы третьей группы из перечисленных в § 6.1 разработаны в наименьшей степени, хотя преимущества аналитических форм в смысле общности результатов, удобства и глубины анализа, выявления качественно новых свойств исследуемых САУ вряд ли вызывают сомнения. При решении многих практических задач численный анализ нелинейных САУ на основе моделирования часто оказывается единственным методом. В этом случае обычно пространство параметров разбивают сеткой, а затем в ее узлах производят численное интегрирование системы дифференциальных уравнений, определяющих движение данной системы. Такой способ при исследовании систем большой размерности громоздок и длителен. Выбор путей решения задач анализа значительно облегчается, если получены в достаточно полном объеме зависимости между характеристиками процессов S и параметрами системы Λ в виде некоторых соотношений $S = \Phi(\Lambda)$. При этом желательна именно аналитическая форма таких зависимостей, поскольку появляется возможность перейти от рассмотрения одного конкретного движения к рассмотрению всей совокупности возможных движений в заданной области. Нахождение таких аналитических зависимостей оказывается особенно важным при исследовании САУ ввиду существенной негрубости этих систем, противоречивости и многоплановости задач анализа. Для получения функций $S = \Phi(\Lambda)$ в последующем анализе САУ предложен машинно-ана-

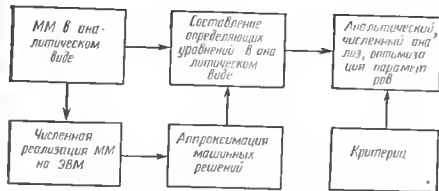


Рис. 6.5. Принцип построения машинно-аналитического метода

литический метод*, даны его теоретическое обоснование и основные алгоритмы реализации.

Принцип построения этого метода представлен на рис. 6.5. Реализация такого метода состоит из следующих этапов:

а) численное решение исходных уравнений движения ММ на ЭВМ — получение машинных решений;

б) аппроксимация машинных решений аналитическими формулами;

в) составление определяющих уравнений, связывающих характеристики процессов с параметрами системы: подстановка аппроксимированных аналитических формул в исходные уравнения, представленные также в аналитическом виде; алгебраические преобразования;

г) анализ системы по определяющим уравнениям путем реализации соответствующих вычислительных алгоритмов на ЭВМ.

Из определяющих уравнений находятся зависимости между характеристиками процессов и параметрами системы в первом приближении. В случае его недостаточной точности организуется процесс последовательных приближений более высокого порядка. Покажем принципы машинно-аналитического метода на простейшем примере.

Пример 6.3. Плоский маятник с переменным демпфированием.

Уравнения движения такого маятника можно представить в форме Коши:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= a_{11}x_2; \\ \frac{dx_2}{dt} &= a_{12}x_1 - a_{22}x_2, \quad x_1(0), \quad x_2(0), \end{aligned} \quad (6.62)$$

* Солнцева Р. И. Об исследовании САУ приближенными аналитическими методами с помощью машинных решений/Системы промышленной кибернетики. Киев, 1969. С. 15—28.

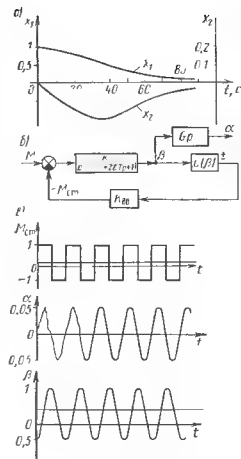


Рис. 6.6. Применение машинно-аналитического метода

Машинно-аналитический метод при анализе нелинейных САУ позволяет обоснованно выбирать пути решения задач анализа благодаря получению с помощью ЭВМ аналитических зависимостей характеристик процессов от параметров системы типа (6.63). При этом анализ нелинейных САУ сводится, по существу, к анализу этих аналитических зависимостей. Задача параметрического синтеза, традиционно связанная с поисковыми процедурами минимизации функционала, заменяется в машинно-аналитическом методе более простой процедурой решения систем определяющих уравнений, поэтому этот метод положен в основу построения комплекса программ подсистемы САУ «Анализ».

Схема алгоритмизации машинно-аналитического метода для САПР САУ приведена на рис. 6.7.

На первом этапе алгоритмизации по исходной ММ, заданной в форме

где a_{11}, a_{12}, a_{21} — постоянные коэффициенты; x_1, x_2 — фазовые координаты маятника; t — время; $x_1(0), x_2(0)$ — начальные условия.

Машинные решения этих уравнений при условиях

$$x_1(0) = 1; \quad x_2(0) = 0; \quad a_{11} = 0,1;$$

$$a_{12} = -0,01; \quad a_{22} = 0,001$$

представлены на рис. 6.6, а. Численная аппроксимация функций времени $\tilde{x}_1(t)$ и $\tilde{x}_2(t)$ приводит к формулам:

$$\tilde{x}_1 = e^{-0,00048t}; \quad \tilde{x}_2 = -0,0105te^{-0,00048t}$$

Эти формулы после замены соответствующими символами примут вид

$$\tilde{x}_1(t) = b_1 e^{-at}; \quad \tilde{x}_2(t) = b_2 t e^{-at}.$$

Составляя определяющие уравнения путем подстановки $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2$ в (6.62), получим следующие соотношения между характеристиками процессов a, b_1, b_2 и параметрами системы $a_{11}, a_{12}, a_{22}, x_1(0), x_2(0)$:

$$2a = -a_{22}; \quad b_2 = a_{12}b_1; \quad 2b_1a = b_1b_2,$$

откуда получаем функции $S = \Phi(A)$ в виде

$$a = a_{22}/2; \quad b_2 = a_{12}b_1; \quad a_{22} = a_{11}a_2. \quad (6.63)$$

Формулы (6.63) позволяют осуществлять анализ и параметрический синтез «системы» (6.62) как в аналитическом, так и в численном виде.

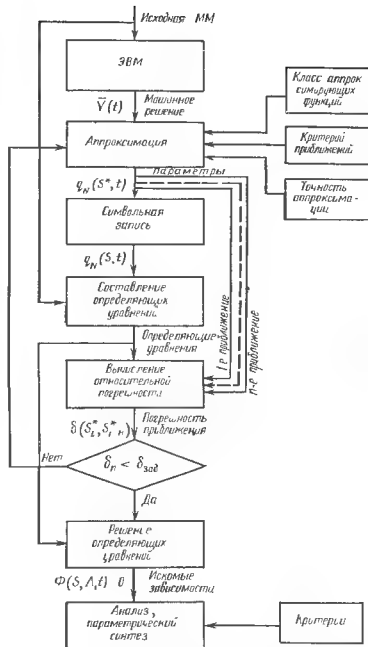


Рис. 6.7. Схема алгоритмизации машинно-аналитического метода

$$\dot{Y} = F(Y, A, t), \quad Y(0) = Y_0, \quad (6.64)$$

с помощью инструмента «Моделирование» определяется частное машинное решение для заданного набора параметров A и начальных условий Y_0 .

На втором этапе осуществляется аппроксимация этого машинного решения. Аппроксимация сводится к последовательному решению таких задач:

- выбор класса аппроксимирующих функций;
- выбор критерия аппроксимаций;
- определение параметров аппроксимирующей функции;
- оценка точности аппроксимации.

При выборе класса аппроксимирующих функций обычно руководствуются видом машинного решения $\bar{Y}(t)$, простотой выбираемых функций, а также целью их дальнейшего использования.

Собственные и вынужденные движения в САУ — это зачастую процессы, близкие по форме к затухающим или расходящимся гармоническим колебаниям. Учитывая это обстоятельство, а также требования, вытекающие из теории машинно-аналитических методов (независимость, дифференцируемость аппроксимирующих функций, принадлежность их к одному классу вместе со своими производными), аппроксимирующие функции выбирают в классе решений линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Поэтому для аппроксимации машинных решений будем использовать обобщенный полином

$$q_N(S, t) = \sum_{i=0}^N a_i \varphi_i(S, t)$$

по системе функций вида

$$\begin{aligned} \varphi_i(S, t) &= e^{\lambda_i t}; \\ \varphi_i(S, t) &= b_i \sin \Omega_i t + c_i \cos \Omega_i t; \\ \varphi_i(S, t) &= e^{\lambda_i t} (b_i \sin \Omega_i t + c_i \cos \Omega_i t), \end{aligned} \quad (6.65)$$

где $S = \{b_i, c_i, \rho_i, \Omega_i\}$ — характеристики процессов.

Аппроксимирующие функции, используемые в процедуре (6.25), (6.26), входят в класс функций (6.65).

Указанный класс функций обладает тем достоинством, что значения параметров обобщенного полинома удобны для разработчика САУ, так как связаны с физикой протекающих процессов. При выборе критериев аппроксимации решений $\bar{Y}(t)$ предпочтение отдается среднеквадратичной норме:

$$\|q\| = \left\{ \int_0^t M(t) [Y(t) - Q_N(S, t)]^2 dt \right\}^{1/2}, \quad (6.66)$$

где $M(t)$ — некоторая весовая функция; $Q_N = (q_{N1}, q_{N2}, \dots, q_{Nn})$.

Если машинное решение представлено таблицей, дающей $n+1$ значений $Y(t)$, то дискретный аналог (6.66) принимает вид

$$\|q\| = \left\{ \sum_{j=0}^n M(t_j) [Y(t_j) - Q_N(S, t_j)]^2 \right\}^{1/2}.$$

На третьем этапе строятся определяющие уравнения. На выходе блока аппроксимации машинных решений (рис. 6.7) получаем числовые значения параметров обобщенного полинома

$$\bar{Y}(t) \cong Q_N(S^*, t), \quad (6.67)$$

где S^* — числовые значения характеристик процессов.

Выражение (6.67) переводится в аналитическую форму представления

$$\bar{Y}(t) \cong Q_N(S, t), \quad (6.68)$$

где S — буквенные представления характеристик процессов. Далее осуществляется составление определяющих уравнений, связывающих характеристики процессов S с параметрами λ исходной модели (6.64). Подставив выражение (6.68) в исходную систему (6.64), получаем

$$\dot{Q}_N(S, t) = F(Q_N(S, t), \lambda, t), \quad Q_N(S, 0) = q_{N0}. \quad (6.69)$$

Составление определяющих уравнений основано на балансе составляющих систем функций $\{\varphi_i(S, t)\}$. После составления условий баланса между функциями выбранного класса $\varphi_i(S, t)$, $i = \overline{1, N}$, получаем систему определяющих уравнений вида

$$\begin{aligned} \Phi(S, A, t) &= 0; \quad \Phi = (\Phi_1, \dots, \Phi_n); \quad S = (S_1, S_2, \dots, S_n); \\ A &= (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n). \end{aligned} \quad (6.70)$$

Для того чтобы избежать ошибок при составлении системы определяющих уравнений, предусмотрена оценка погрешности приближения. Исходной информацией для контроля служат числовые значения аргументов S^* аппроксимирующих функций $q_N(S^*, t)$. Пусть один из элементов вектора S^* считается неизвестным (S_1^*). Найдем его новое значение (S_1^{*n}) путем подстановки в систему (6.70) остальных ($S_2^*, \dots, S_n^*$).

Тогда относительная ошибка $\delta(S_1^*, S_1^{*n})$, полученная в силу уравнений (6.70), позволяет судить о возможности их дальнейшего использования. Если ошибка превосходит некоторое заданное значение, то составляют систему определяющих уравнений во втором приближении. Для получения определяющих уравнений во втором и последующем приближениях разработаны две процедуры.

В первой процедуре (рис. 6.7) точность получения определяющих уравнений связана с улучшением точности аппроксимации машинных решений за счет увеличения числа членов обобщенного

ЗАДАНИЕ :

ПРОВЕСТИ ОБРАБОТКУ СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА, ЗАДАНОГО РЕАЛИЗАЦИЕЙ, ПРИВЕДЕННОЙ В ТАБЛИЦЕ 1 (величины представлены в относительных единицах) С ПАРАМЕТРАМИ ДИСКРЕТНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ DEL = 3600 С. ДЛИНА РЕАЛИЗАЦИИ L = 360000С

ТАБЛИЦА 1

1.64	2.07	2.41	1.73	2.48	9.22	1.61	2.17	9.22	1.26
1.02	-1.78	-7.78	1.06	1.70	-1.78	1.71	-2.85	-2.69	4.00
3.30	-5.34	-4.57	3.21	-6.22	-5.01	6.01	-6.72	-5.64	9.05
7.26	-7.03	-6.19	-6.71	6.63	-9.09	-8.67	-7.73	-7.31	7.55
-8.44	7.34	-5.68	-4.47	5.34	-5.11	5.54	-3.37	-2.32	-4.18
3.39	2.73	-3.68	-4.02	-6.33	-5.84	5.83	5.59	-7.63	-6.59
-7.38	8.68	8.79	-11.70	-12.00	-10.80	-10.20	9.06	-8.81	11.10
-11.70	11.30	-10.50	-11.60	-10.60	-8.90	-9.07	8.99	-8.26	7.31
6.00	-8.62	8.16	-8.47	-11.00	-11.40	-12.60	12.20	-11.50	11.10
12.20	-12.30	12.90	12.90	-12.10	-12.10	-13.60	-12.00	12.20	-13.64

Рассчитать характеристики нестационарного случайного процесса: тренд по математическому ожиданию, тренд по дисперсии. Перейти к стационарному случайному процессу. Рассчитать характеристики стационарного случайного процесса: математическое ожидание, дисперсия.

РЕЗУЛЬТАТ:

ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПРОЦЕССА:
тренд по математическому ожиданию
(оптимальный интервал при сглаживании = 57500 с)

*3600С	Функция	*3600С	Функция	*3600С	Функция
02	0.295E 01	18	- .251E 01	34	741E 01
04	0.295E 01	20	- .351E 01	36	748E 01
06	0.380E 01	22	431E 01	38	784E 01
08	0.293E 01	24	511E 01	40	-715E 01
10	0.644E 01	26	- .566E 01	42	- .640E 01
12	0.146E 00	28	- .633E 01	44	0.440E 02
14	- .173E 01	30	694E 01	46	- .450E 01
16	222E 01	32	- .720E 01	48	469E 01

тренд по дисперсии
(оптимальный интервал при сглаживании = 115200 с)

*3600С	Функция	*3600С	Функция	*3600С	Функция
02	0.111E 02	20	0.487E 01	38	0.810E 00
04	0.111E 02	22	0.167E 01	40	0.934E 00
06	0.111E 02	24	0.841E 00	42	0.938E 00
08	0.111E 02	26	0.985E 00	44	0.863E 00
10	1.109E 02	28	0.114E 01	46	0.866E 00
12	0.109E 02	30	0.111E 01	48	0.921E 00
14	0.682E 01	32	0.689E 00	50	0.777E 00
16	0.682E 01	34	0.104E 01	52	0.736E 00
18	0.528E 01	36	0.114E 01	54	0.743E 00

ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЦИОНАРНОГО СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА:
математическое ожидание 0.9845E-02, дисперсия = 0.9858E 00

Изм	Лист	N докум	Подп	Дата	ПРОЕКТНАЯ ПРОЦЕДУРА	Лист
Инв N подл	Подл и дата	Взем инв N	Инв N дубл	Подл и дата		

Рис. 6.10. Проектный документ, изготовленный подсистемой «Анализ»

(6.26) — (6.32) по получению оценок статистических характеристик; 13, 14 — вспомогательные модули, такие, как быстрое преобразование Фурье;

8—12 — модули аппроксимации стационарных случайных процессов.

Входными данными для работы этого программного комплекса являются массивы значений случайных процессов, заданные в виде таблицы, размерность массивов и период дискретизации во времени (предполагается, что дискретизация произведена с выполнением условия теоремы Котельникова).

В заключение этой главы на рис. 6.10 приведен проектный документ, изготовленный при выполнении проектной процедуры анализа точностных характеристик навигационного устройства ЛА.

ГЛАВА 7

АВТОМАТИЗАЦИЯ СИНТЕЗА САУ

§ 7.1. Методы синтеза САУ и их применение в САПР

Под синтезом в научных исследованиях и проектировании обычно понимают решение задач, обратных анализу: определение структуры и параметров системы или процесса в соответствии с заданными критериями качества и условиями функционирования.

Задачи синтеза являются важнейшими и в то же время наиболее сложными при проектировании различных систем и процессов. Как уже отмечалось в предыдущей главе, некоторые задачи синтеза могут быть решены методами анализа. Более того, опытный инженер-проектировщик часто находит вполне пригодные структуру и параметры САУ на основе приближенных расчетов и эвристических методов. Однако трудоемкость такого синтеза оказывается весьма значительной. Так, надо осуществить до нескольких сотен вариантов анализа при выборе корректирующего звена САУ ТГ или параметров САУ ГСП и т. д. Получение проектных решения требует «доводить» на последующих этапах проектирования, возможны и принципиальные ошибки в проектных решениях. При синтезе структуры и параметров САУ, как правило, не учитываются конструкторские и технологические особенности реализации отдельных устройств и элементов САУ и особенно стыковки их между собой. Например, корректирующее звено с передаточной функцией

$$\frac{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}{(T_3 p + 1)(T_4 p + 1)},$$

получение методами традиционного синтеза, может оказаться нереализуемым (в частности, на пассивных или активных фильтрах), если не удастся обеспечить требуемого соотношения между постоянными времени T_1, T_2, T_3, T_4 в условиях конструктивных и технологических ограничений.

Прямая реализация теоретических и инженерных методов синтеза, не ориентированных на ЭВМ, часто оказывается невозможной из-за быстрого истощения возможностей ЭВМ по быстродействию и оперативной памяти, неустойчивости вычислительного процесса, накопления методических и трансформированных ошибок, сложности логических операторов и т. д. Поэтому для применения традиционных методов синтеза в САПР требуется их машинная ориентация. Определяющим условием правильной постановки задачи синтеза и построения соответствующего инструмента САПР является формализация целей, критериев и ограничений. Критерии и ограничения при проектировании САУ многочисленны и противоречивы, существенно зависят от типа САУ и условий их эксплуатации. Отмеченное обстоятельство иллюстрируется (см. § 2.1) составом целей и критериев, содержащихся в ТЗ на САУ. Критерии, принимаемые при проектировании САУ, можно представить следующими векторами:

$$\begin{aligned} \text{качество } K &= (K_1, K_2, \dots, K_n), \\ \text{мощность } M &= (M_1, M_2, \dots, M_n), \\ \text{масса (вес) } B &= (B_1, B_2, \dots, B_n), \\ \text{габаритные размеры } G &= (G_1, G_2, \dots, G_n), \\ \text{надежность } H &= (H_1, H_2, \dots, H_n), \\ \text{ремонтпригодность } P &= (P_1, P_2, \dots, P_n), \\ \text{стоимость } C &= (C_1, C_2, \dots, C_n). \end{aligned} \quad (7.1)$$

Компоненты этих векторов отражают соответствующие составляющие, имеющие естественное физическое содержание: $K_1, \dots, K_n$ — запасы устойчивости, время переходного процесса, динамические и статические ошибки, колебательность, оценки эффективности; $M_1, \dots, M_n$ — мощность, потребляемая устройствами САУ, рассеиваемая энергия, энергетические ресурсы источников питания; $B_1, \dots, B_n$ — вес отдельных устройств и элементов САУ; $G_1, \dots, G_n$ — габариты отдельных устройств и элементов САУ; $H_1, \dots, H_n$ — среднее время между отказами, восстанавливаемость, показатели старения САУ, ее устройств и элементов; $P_1, \dots, P_n$ — ремонтпригодность устройств и элементов, восстанавливаемость, доступность при ремонте; $C_1, \dots, C_n$ — стоимость отдельных устройств и элементов и всей системы.

В § 2.1 приведены и другие критерии, но даже перечисленные показывают, насколько сложна задача их объединения в единую математическую форму — функционал, причем такой функционал должен связывать структуру и параметры САУ с целями их проектирования. Поэтому часто поступают следующим образом: вы-

деляют главные критерии и второстепенные. По главным отыскиваются экстремальные значения, а на второстепенные накладывают ограничения. В частности, условия

$$\max\{K, H\}; \min\{B, G, M\} \text{ при } C \leq C_n \quad (7.2)$$

могут применяться при проектировании САУ ЛА и САУ ГСП; условия

$$\max\{K, H\}; \min\{C\} \text{ при } B \leq B_n, G \leq G_n \quad (7.3)$$

применяются при проектировании САУ ТГ.

Попытки формулирования обобщенного функционала цели проектирования САУ в виде линейной формы

$$\begin{aligned} \min \\ (\max) \end{aligned} \{Q^i = \alpha_1 K + \alpha_2 M + \alpha_3 B + \alpha_4 G + \alpha_5 H + \alpha_6 P + \alpha_7 C\} \quad (7.4)$$

оказываются несостоятельными ввиду практической неразрешимости задачи оптимального выбора весовых коэффициентов α_i . Не меньшие затруднения возникают и для нелинейных функционалов вида

$$\min \\ (\max) \{Q^i = \Phi(K, M, B, G, H, P, C)\}. \quad (7.5)$$

В тех случаях, когда удастся связать некоторые из критериев C, K, H, M, B, G, P со структурой и параметрами САУ, задачи синтеза САУ сводятся обычно к задаче нелинейного программирования (в частном случае — линейного программирования).

Если же при решении этой задачи приходится интегрировать дифференциальные уравнения, то возникает задача вариационного исчисления и ее развития в виде принципа максимума Л. С. Понтрягина, метода динамического программирования Р. Беллмана. В некоторых случаях в виде функционала цели системы принимают вероятность выполнения условий

$$P = P(C \leq C_n, K \geq K_n, B \leq B_n, G \leq G_n, H \geq H_n, M \leq M_n). \quad (7.6)$$

Этот функционал зависит от случайных функций и случайных величин. Функционал (7.6) в отличие от (7.4), (7.5) имеет физический смысл, но вычисление его — исключительно тяжелая задача, посильная только при наличии специальных средств САПР САУ. В частности, для синтеза САУ ЛА функционал (7.6) означает синтез такой САУ, где достигалась бы наибольшая вероятность $\max\{P\}$ удовлетворения всех заданных требований: запасы устойчивости, качество регулирования движения ЛА вокруг центра масс и относительно траектории, точность полета по программе, минимальные все и габариты, минимальный расход горючего, ..., ремонтпригодность БЦВМ и т. д.

В некоторых случаях помимо функционалов (7.4), (7.5) и (7.6) используются функционалы типа функций «потерь» или «штрафов». Наиболее распространенная форма представления этого критерия — это условное математическое ожидание штрафа за ошибку:

$$Q''' = \int_{-\infty}^{\infty} G[\varepsilon(z)] P\left(\frac{\varepsilon}{z}\right) d\varepsilon, \quad (7.7)$$

где $G[\varepsilon(z)]$ — штраф (цена) за ошибку; $\varepsilon(z) = Y - \bar{Y}(z)$; Y — истинное значение вектора выходных характеристик САУ, а $\bar{Y}(z)$ — их оценка, основанная на некоторых наблюдениях z ; $P(\varepsilon/z)$ — условная плотность вероятности.

Переход от обобщенных функционалов (7.4)–(7.7) к частным видам (7.2), (7.3) осуществляется в зависимости от типа САУ и конкретной задачи синтеза. Так, далеко не полный учет требований, предъявляемых только к системе стабилизации ГСП (см. § 2.2, рис. 2.8), приводит к следующим критериям и ограничениям, накладываемым на углы стабилизации α_i , углы прецессии β_i , моменты разгрузочных двигателей δi_{ct} , время переходного процесса $t_{пл}$, управляющий двигателем сигнал $\sigma(t)$:

$$Q_{ГСП} = \min \{ \alpha_i(t), \beta_i(t), t_{пл,i}, i = \overline{1, 3}; \\ |M_{ct}(t)| < M_{ct, доп}; \\ |\beta(t)| < \sigma_{доп} \} \quad (7.8)$$

в передаточной функции $\frac{\sigma(p)}{\beta(p)} = \frac{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0}{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_0}$ должны выполняться соотношения $a_n = \varphi_n(b_1, b_2, \dots, b_m)$, $n \leq m \leq d$, как одно из условий технической реализации регулятора.

Для САУ ТГ (см. рис. 1.4) критерии и ограничения синтеза выглядят следующим образом:

$$Q_{ТГ} = \min_{x > x_{доп}} \{ \Delta p, \Delta \omega, \Delta T_1 < \Delta T_1^{доп}, \Delta T_2 < \Delta T_2^{доп}, H > H_{доп}, \} \quad (7.9)$$

где Δp — ошибка стабилизации давления газа; $\Delta \omega$ — ошибка стабилизации частоты вращения турбины; $\Delta T_1^{доп}$, $\Delta T_2^{доп}$ — ограничения на допуск по температуре продуктов сгорания ТГ; $H_{доп}$ — ограничения по надежности ТГ.

Критерии синтеза (7.8), (7.9) представляют также в форме интегральных критериев качества А.А. Фельдбаума (6.24).

При реализации традиционных методов синтеза в САПР САУ к ним предъявляются следующие требования: устойчивость и скорость вычислений на ЭВМ; методологические удобства примене-

ния методов в соответствии с общей идеологией САПР САУ; достаточная близость или хотя бы непротиворечивость критериев синтеза по отношению к критериям, применяемым разработчиками САУ.

Деление на алгебраические, частотные и корневые методы синтеза сохраняется в том же виде, что и при анализе САУ. Однако содержание и направленность их принципиально иные. Если при анализе требовались оценки устойчивости, качества, точности, то при синтезе необходимо найти структуру и параметры в основном изменяемой части САУ, обеспечивающие заданные критерии по устойчивости, качеству и точности.

Алгебраические методы синтеза для одномерной САУ строятся на определении вида и параметров передаточной функции изменяемой части САУ в выражении

$$y(p) = \frac{W_{yx}(p) x(p)}{1 + W_{yx}(p) W_{uy}(p)}, \quad (7.10)$$

где $x(p)$, $y(p)$ — соответствующие преобразования Лапласа $x(t)$ и $y(t)$ (начальные условия считаем нулевыми); $W_{yx}(p)$, $W_{uy}(p)$ — передаточные функции неизменяемой части САУ (объекта управления) и изменяемой ее части соответственно; u — управляющее воздействие; $y(p)$ — желаемый (заданный) вид решения системы на заданное входное воздействие $x(p)$.

Поскольку $W_{yx}(p)$ связывает входное воздействие $x(p)$ и реакцию системы $y(p)$, при заданных $x(p)$ и $y(p)$ получаем алгебраическое уравнение

$$y(p) [P(p) \Pi(p) + Q(p) \cdot \Theta(p)] = X(p) \cdot P(p) \cdot \Theta(p), \quad (7.11)$$

в котором $P(p)$, $Q(p)$ суть известные заданные полиномы от p $W_{yx}(p) = P(p)/Q(p)$, $W_{uy}(p) = \Pi(p)/\Theta(p)$, $\Theta(p)$, $\Pi(p)$ — полиномы от p , которые необходимо построить.

В общем случае уравнение (7.11) представляет собой одно уравнение с двумя неизвестными $\Theta(p)$ и $\Pi(p)$ и относится к диофантовым (Диофант — древнегреческий математик) уравнениям. Для нахождения решения этого уравнения добавляются условия устойчивости системы (7.10) физической реализуемости изменяемой части САУ $W_{uy}(p)$. В последнем случае, в частности, требуется, чтобы степень полинома $\Theta(p)$ была выше степени полинома $\Pi(p)$. Эту систему уравнений следует дополнить условиями устойчивости, составляемыми по критерию Рауса (см. § 6.1, табл. 6.3) $R_h(a_i) > 0$, где a_i — коэффициенты характеристического полинома $\Delta(p) = P(p) \cdot \Pi(p) + Q(p) \cdot \Theta(p)$ в (7.10); $R_h(a_i)$ — коэффициенты первого столбца таблицы Рауса (см. табл. 6.3).

Вместо неравенств можно получить уравнения для условий устойчивости. При этом необходимо задать степень устойчивости системы (7.10) $\eta = \min \{ \operatorname{Re} \lambda_i \}$.

Тогда уравнение (6.1), соответствующее $\Delta(p)$, преобразуется к смещенному характеристическому уравнению

$$a_0(\lambda - \eta)^n + a_1(\lambda - \eta)^{n-1} + \dots + a_n = 0.$$

После пересчета коэффициентов это уравнение примет вид

$$a_0^* \lambda^n + a_1^* \lambda^{n-1} + \dots + a_n^* = 0, \quad (7.12)$$

где $a_k^* = \sum_{i=1}^n (-1)^{n-i} C_{n-i}^k a_i \eta^{n-i-k}$; k — номер коэффициента; C_{n-i}^k — число сочетаний по k — i из $n-i$.

Желаемый процесс $y(t)$ можно сформировать из операторного изображения переходных характеристик, задаваемого в обобщенном виде

$$y(p) = \frac{a_1 p + 1}{(b_1 p^2 + b_2 p + b_3)(c_1 p + 1)}.$$

Придавая параметрам a_1, b_1, b_2, b_3, c_1 различные значения от нуля до предельных значений, можно получать колебательные, апериодические и другие формы переходных процессов. В частности, при $c_1 = 0$ изображение желаемого процесса по Лапласу имеет вид

$$y(p) = \frac{a_1 p + 1}{b_1^2 p^2 + b_2 p + 1} = \left\{ \begin{array}{l} C_1 (e^{-n_1 t} + e^{-n_2 t}); \\ C_2 (e^{-n_1 t} \cdot \cos \omega t) \end{array} \right\} \quad (7.13)$$

соответственно при вещественных и комплексных полюсах. В этих выражениях C_1, C_2 определяют величину динамической ошибки σ ; $\sigma_{\max} = C_2 e^{-n_1/\mu}$, где $\mu = \omega/n_2$ — колебательность процесса; запасы устойчивости определяются величинами n_1 ($n_1 < n_2$) и n_2 .

Рассматривая наиболее тяжелый режим работы САУ — отработку ступенчатых воздействий $x(p) = 1/p$, задачу синтеза можно свести к решению алгебраических уравнений (7.11), (7.12) относительно неизвестных коэффициентов полиномов $\Theta(p), \Pi(p)$. В общем случае подобные уравнения решаются с помощью алгоритма Евклида. Распространение этого метода на многомерные системы (6.6) — (6.8) сводится к решению матричного алгебраического уравнения для многомерной САУ

$$Y(p) - [E + W_{yx}(p) \cdot W_{uy}(p)]^{-1} \cdot W_{yx}(p) \cdot X(p), \quad (7.14)$$

где $Y(p), X(p), W_{yx}(p), W_{uy}(p)$ — векторы и матрицы, определяемые выражениями (6.6), (6.8). Если задать виды возмущающих воздействий $X(p)$, желаемый вид выходных процессов САУ $Y(p)$ и неизменяемая часть САУ $W_{yx}(p)$, то из матричного уравнения (7.14) можно найти матрицу $W_{uy}(p)$ как результат решения системы алгебраических уравнений (7.14). В этом случае, так же как и в скалярном, к уравнениям (7.14) следует добавить условия устойчивости системы (7.14) и физической реализуемости неизменяемой части САУ $W_{uy}(p)$.

Рассмотренный подход развит в виде метода полиномиальных уравнений*, который может быть применен как к непрерывным, так и к цифровым регуляторам САУ. В последнем случае этот метод наиболее эффективен. По существу он является численным методом решения определенного круга вариационных задач и позволяет единообразным путем, учтя условия физической реализуемости и устойчивости САУ, получить в явной форме выражение оптимальной передаточной функции регулятора W_{uy} . Важным достоинством метода является то, что оптимальность здесь понимается не только в смысле быстродействия, но и в смысле компенсации нежелательных отклонений САУ от заданного движения, что приближает задачу синтеза к инженерной постановке в смысле критериев (7.8) — (7.9).

Применение метода полиномиальных уравнений требует перевода к «дискретной модели» непрерывной части системы, т. е. представления (3.15) в формах (3.26), (3.27).

Для удобства последующего изложения рассмотрим алгоритм метода применительно к одномерной системе (7.10). Осуществляя преобразование функции (7.10), представим ее в виде

$$y(z) = \frac{x \cdot W_{yx}(z)}{1 + W_{yx}(z) \cdot W_{uy}(z)}, \quad (7.15)$$

$W_{yx}(z) = P(z)/Q(z)$ — заданная передаточная z -функция неизменяемой части системы; $x \cdot W_{yx}(z) = L(z)/R(z)$ — передаточная z -функция участка контура регулирования между точкой приложения возмущающего воздействия $x(z)$ и координатой $y(z)$; $W_{uy}(z)$ — искомая функция регулятора.

Для компенсации «нежелательных» полюсов и нулей в передаточной функции $W_{yx}(z)$ применяется операция факторизации. Эта операция состоит в следующем. Представим функцию $W_{yx}(y)$ в виде

$$W_{yx}(z) = \frac{P^+(z) \cdot P^-(z)}{Q^+(z) \cdot Q^-(z)}, \quad (7.16)$$

где $\frac{P^+(z)}{Q^+(z)}$ — дробно-рациональная функция, имеющая нули и полюсы в области устойчивости, в данном случае — внутри круга единичного радиуса $|z|=1$, а $\frac{P^-(z)}{Q^-(z)}$ имеет нули и полюсы вне области устойчивости.

* Волгин Л. Н. Оптимальное дискретное управление динамическими системами, М., 1986.

Представим искомую функцию $W_{wy}(z)$ произведением трех сомножителей:

$$W_{wy}(z) = \frac{Q^+(z)}{P^+(z)} \cdot \frac{1}{R(z)} \cdot \frac{\Theta(z)}{\Pi(z)}, \quad (7.17)$$

где Θ, Π — неизвестные полиномы.

Подставляя (7.16), (7.17) в (7.15), найдем

$$y = \frac{L \cdot \Pi \cdot Q}{Q^+ \cdot R \Pi + P \Theta}. \quad (7.18)$$

Определим неизвестные полиномы Θ и Π как минимальное решение (т. е. решение, при котором степени полиномов Θ и Π наименьшие) полиномиального уравнения

$$Q R \Pi + \Theta = 1. \quad (7.19)$$

Тогда $y(t)$ будет процессом конечной минимальной длительности при возможности одновременного обеспечения устойчивости и минимума динамической ошибки. Подставляя найденные Π и Θ в (7.17), находим искомую функцию $W_{wy}(z)$.

При использовании наряду с принятыми дополнительными критериев синтеза, например минимальной суммарной квадратичной ошибки, как выражение (7.17), так и полиномиальное уравнение (7.19) могут значительно усложниться, что, однако, не носит принципиального характера. Метод позволяет весьма точно учитывать ограничения со стороны неизменяемой части системы путем привнесения аппарата линейного программирования. Задачи статистического синтеза также сводятся к решению систем полиномиальных уравнений. Применительно к задачам синтеза регуляторов САУ метод полиномиальных уравнений имеет ряд преимуществ: простоту машинной ориентации метода, практическое отсутствие вычислительных трудностей и возможность синтеза систем, обладающих свойством удовлетворять совокупности различных требований (достигается абсолютный экстремум по одному из критериев при относительных экстремумах по остальным). Результатом синтеза является передаточная z -функция или эквивалентное разностное уравнение, реализуемые в дальнейшем на микропроцессоре САУ.

Покажем построение исходных для программной реализации на микропроцессоре алгоритмов регулирования на примере.

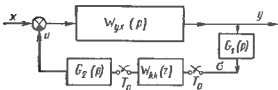


Рис. 7.1. Структурная схема САУ с дискретным регулятором

Пример 7.1. Синтез дискретного регулятора САУ. На рис. 7.1 приведена структурная схема САУ с дискретным регулятором. Передаточные функции $W_{gx}(p)$, $G_1(p)$, $G_2(p)$ имеют

$$W_{gx}(p) = \frac{K_1}{1 + 2\xi T p + T^2 p^2};$$

$$G_1(p) = \frac{K_2}{p}, \quad G_2(p) = \frac{1 \cdot e^{-pT_0}}{p}, \quad (7.20)$$

где T_0 — такт дискретности; $G_2(p)$ — передаточная функция экстраполятора нулевого порядка; $W_{gx}(p)$, $G_1(p)$ — передаточные функции неизменяемой части САУ; $W_{gx}(p)$ — искомая передаточная функция изменяемой части САУ — «корректирующего контура».

В дискретных регуляторах W_{gx} реализуется программно на микропроцессоре и синтез W_{gx} сводится к построению разностного уравнения связи — управляющего воздействия U с измеряемым сигналом y , поступающим на вход микропроцессора.

Следуя алгоритму (7.16) — (7.19), находим дискретную передаточную функцию разомкнутой системы $A(z)$ как z -изображение ее неизменяемой части при $z = e^{-pT_0}$:

$$A(z) = \xi \{G_2(p) W_{gx}(p) G_1(p)\} = k(1-z) \xi \left\{ \frac{W_{gx}(p) G_2(p)}{p} \right\} = \frac{kz}{1-z} \cdot \frac{a_0 + a_1 z + a_2 z^2}{1 + b_1 z + b_2 z^2} = \frac{P(z)}{Q(z)}, \quad (7.21)$$

где

$$\begin{aligned} a_0 &= T_0 + 2\xi T (d \cos \gamma - 1) - \chi T \sin \gamma; \\ a_1 &= -2T_0 d \cos \gamma + 2\xi T (1 - d^2) + 2\chi T d \sin \gamma; \\ a_2 &= T_0 d^2 + 2\xi T (d^2 - d \cos \gamma) - \chi T \sin \gamma; \\ b_1 &= -2d \cos \gamma; \quad b_2 = d^2; \quad d = e^{-\frac{T}{T_0}}; \end{aligned}$$

$$\gamma = \frac{T_0}{T} \sqrt{1 - \xi^2}; \quad \chi = \frac{1 - 2\xi^2}{\sqrt{1 - \xi^2}}; \quad K = K_1 K_2.$$

Далее требуется определить z -изображение замкнутой системы. Проведем эту операцию, рассматривая в роли изображения замкнутой системы z изображение ее выходного сигнала $y(z)$ при заданном виде возмущения $x(z)$:

$$y(z) = \frac{xG(z)}{1 + A(z)W_{gx}(z)}. \quad (7.22)$$

Согласно (7.16), передаточную функцию $A(z)$ следует представить в виде

$$A(z) = \frac{P^+(z)}{Q^+(z)} \cdot \frac{P^-(z)}{Q^-(z)}, \quad (7.23)$$

где P^+ , Q^+ и P^- , Q^- — полиномы, соответственно компенсируемые и некомпенсируемые в смысле условий физической реализуемости.

Конкретный их вид зависит от выбора такта дискретности T_0 . Так, при выполнении условия теоремы Котельникова для САУ эти полиномы определяются выражениями

$$\begin{aligned} P^+ &= 1 - S_1 z; \quad P^- = K^* z (1 - S_2 z); \\ Q^+ &= 1 + b_1 z + b_2 z^2; \quad Q^- = 1 - z, \end{aligned} \quad (7.24)$$

где $S_1=1/p_1$; $S_2=1/p_2$; $K^*=Kc_2p_1p_2$; p_1, p_2 — корни уравнения $P(z)=0$.
Теперь выражение (7.22) можно представить следующим образом:

$$y(z) = \frac{xG(z)}{1 + \frac{p^+}{Q^+} \cdot \frac{P^-}{Q^-} W_{к.к.}(z)}, \quad (7.25)$$

где $XG(z)$ — функция, вид которой зависит от вида возмущающего воздействия. Пусть $x(t)=x_0=\text{const}$. Тогда $XG(z)$ будет дробно-рациональной функцией

$$XG(z) = L(z)/R(z), \quad (7.26)$$

где $L(z)$ — полином 2-й степени; $R(z)$ — полином, тождественный знаменателю $A(z)$.

Для того чтобы удовлетворить критерию максимального быстродействия САУ, нужно, чтобы $y(t)$ представлял собой процесс конечной и минимальной длительности. Отсюда следует, что $y(t)$ должен быть полиномом минимальной степени.

Представим искомую передаточную функцию $W_{к.к.}(z)$ в виде (7.17). Тогда с учетом выражения (7.24) запишем уравнение (7.19) в виде

$$(1-z)^2(1+\theta_1z+\theta_2z^2)\pi + k^*(1-S_2z)\theta = 1. \quad (7.27)$$

В данном случае полиномы Q^+ , L , P^- имеют сравнительно невысокую степень, что позволяет проиллюстрировать решение в аналитической форме. Как видно из (7.27), минимальные степени искомых полиномов θ и π таковы:

$$|\theta| = 3; \quad |\pi| = 1.$$

Таким образом,

$$\theta = \theta_0 + \theta_1z + \theta_2z^2 + \theta_3z^3; \quad \pi = \pi_0 + \pi_1z. \quad (7.28)$$

Выражения (7.28) и (7.27) однозначно определяют структуру «корректирующего контура» дискретного регулятора и его параметры. Действительно, после несложных преобразований получим

$$W_{к.к.}(z) = \frac{M_0 + M_1z + M_2z^2 + M_3z^3}{1 + N_1z + N_2z^2 + N_3z^3}, \quad (7.29)$$

где $M_0=\theta_0$; $M_1=\theta_1$; $M_2=\theta_2$; $M_3=\theta_3$; $N_1=\pi_1-S_1-1$; $N_2=S_1-\pi_1-S_1\pi_1$; $N_3=S_1\pi_1$.

Выражение (7.29) определяет линейное разностное уравнение 3-го порядка

$$u(nT_0) = \sum_{i=0}^3 M_i c(nT_0 - iT_0) - \sum_{j=1}^3 N_j d(nT_0 - jT_0), \quad n = \overline{0, v}. \quad (7.30)$$

Из выражения (7.30) следует, что длительность переходного процесса $y(t)$ должна быть равной четырем тактам дискретности микропроцессора САР. Реализация алгоритма на микропроцессоре САР осуществляется с помощью автоматических средств программирования микропроцессоров — программатора.

В § 7.3 будут описаны компоненты инструмента САПР САУ «Синтез», который производит перечисленные операции: перемножение полинома на полином, приведение подобных членов, минимальное решение полиномиального уравнения (7.19). Применение этого инструмента позволяет осуществлять синтез изменяемой части ряда многомерных САУ высокого порядка. Естественно, при этом приходится решать систему из уравнений типа (7.19).

Частотные методы синтеза САУ строятся на основе критериев качества, связанных с ЧХ: запасы устойчивости по фазе (φ) и по амплитуде (L), показатель колебательности (M), частота среза разомкнутой системы ($\omega_{\text{ср}}$) при учете ограничений на величину динамической ($Y_{\text{дин}}$) и статической ошибок ($Y_{\text{ст}}$), обусловленных типовыми воздействиями.

Системы регулирования считаются приемлемыми, если выполняются неравенства

$$\varphi \geq \varphi^*, \quad L \geq L^*, \quad M \leq M^*, \quad \omega_{\text{ср}} \sim \omega_{\text{ср}}^*, \quad (7.31)$$

где $\varphi^* \geq 30^\circ$, $L^* \geq 10$ Дб; $M \leq 1,3$; $\omega_{\text{ср}}^*$ — заданные числа.

В простейшем случае такая задача решается путем машинной оптимизации метода АФЧХ. В качестве исходных данных задается исходная структурная схема САУ, свойства которой не удовлетворяют критериям (7.31).

На структурной схеме выделяются точки возможного съема и ввода сигналов коррекции, т. е. задается множество возможных мест включения коррекции. По заданным требованиям к динамике системы в соответствии с какой-либо из известных методик частотного синтеза формируются асимптотические логарифмические ЧХ (ЛЧХ) нескольких разомкнутых желаемых САУ, которые должны быть согласованы с ЛЧХ исходной разомкнутой системы и могут отличаться некоторыми параметрами. Автоматизация процедуры синтеза состоит в получении передаточной функции корректирующего звена, обеспечивающего совпадение ЛЧХ разомкнутых желаемой и скорректированной САУ. После получения такой передаточной функции могут быть осуществлены ее аппроксимация и подбор соответствующего «ближайшего» из существующих корректирующих звеньев. Затем проводится анализ скорректированной системы и, если она не удовлетворяет требованиям (7.31), делается следующая итерация синтеза.

Пример 7.2. Синтез корректирующего звена САР ТГ по ЛЧХ.

Пусть требуется осуществить синтез коррекции САР частоты вращения турбоагрегата, структурная схема которой представлена на рис. 39, б. Частотные характеристики эквивалентной разомкнутой исходной системы без звена δ , полученные с помощью подсистемы «Анализ», изображены на рис. 7.2 ($L_{\text{исх}}$).

Из анализа ЧХ $L_{\text{исх}}$ следует, что исходная система неустойчива.

Пусть передаточная функция (ПФ) разомкнутой желаемой системы ($L_{\text{ж}}$) имеет вид

$$W(p) = \frac{6.175p^4 + 91p^3 + 299p^2 + 456p + 78.2}{p(0.0475p^5 + 1.1845p^4 + 9.535p^3 + 25.36p^2 + 9.7p + 1)}. \quad (7.32)$$

ЛЧХ желаемой системы приведены на рис. 7.2. Требуется определить передаточную функцию корректирующего звена параллельного типа, сигнал коррекции снимается с выхода звена 4 и передается на вход сумматора 3. ЧХ коррекции $L_{\text{к}}$, рассчитанная с помощью соответствующего программного модуля подсистемы «Синтез» (блок-схема алгоритма приведена на рис. 7.3), показана на рис. 7.2.

Распространение методов синтеза САУ по ЧХ на многомерные САР приводит к необходимости преобразования матричных передаточных функций (6.7)—(6.10) к матрицам специального вида $W(p)$, обладающим свойствами матриц Ж. С. Адамара (французский математик, 1865—1963)

$$W_{ii}(p) > \sum_{j \neq i}^n |W_{ij}(p)|, \quad i = \overline{1, n} \quad (7.33)$$

когда диагональные элементы матрицы $W(p)$ превосходят по модулю все остальные. Синтез корректирующих контуров многомерной САР на основе матриц Адамара предложен американским ученым в области теории САУ Х. Розенбромом и развит советскими специалистами под руководством одного из основоположников теории систем управления и нашей стране В. В. Солодовникова*.

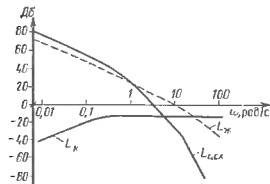


Рис. 7.2. Логарифмические ЧХ СРЧ ТТ

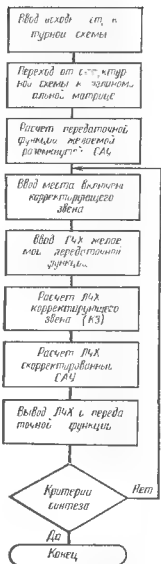


Рис. 7.3. Алгоритм синтеза коррекции САУ по ЛЧХ

Корневые методы синтеза применительно к САУ основаны на построении траекторий корней характеристического полинома передаточной функции (7.10) в зависимости от изменений синтезируемых параметров $W_{uv}(p)$ в предположении, что структура $W_{uv}(p)$ — известна. В качестве критерия синтеза используется, в частности, степень устойчивости САУ η .

* В. В. Солодовников, В. И. Сивцов, Н. А. Чулкин. Пакетная система для автоматизированного синтеза частотным методом // Автоматизация проектирования систем управления, статистика, 1982. Вып. 4, С. 62—74.

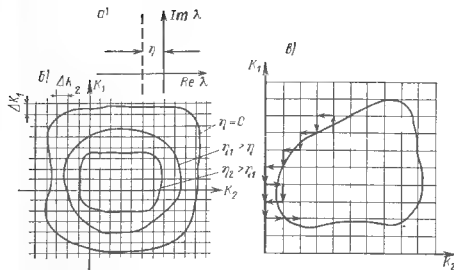


Рис. 7.4. Построение областей устойчивости САУ на основе корневых методов

Рассмотрим параметрический синтез по двум параметрам функций $W_{uv}(p)$, K_1 и K_2 , в зависимости от степени устойчивости η (рис. 7.4, а). В случае двух параметров K_1, K_2 уравнение (6.1) имеет вид

$$a_0(K_1, K_2)\lambda^n + a_1(K_1, K_2)\lambda^{n-1} + \dots + a_n(K_1, K_2) = 0, \quad (7.34)$$

где зависимости $a_i(K_1, K_2)$ считаются заданными.

Построение $K_1 = F(K_2)$ осуществляется следующим способом (рис. 7.4, б). Плоскость K_1, K_2 разбивается сеткой с выбранным шагом на квадраты $\Delta K_1 \times \Delta K_2$; при замороженных значениях K_2 проходят все узлы K_1 ; выводится на печать те значения K_2, K_1 , при которых происходит пересечение границы области устойчивости; уточняют границу путем дробления сетки

$$\frac{\Delta K_1}{S} \times \frac{\Delta K_2}{S}; \quad S = 2N.$$

Процесс вычислений становится более эффективным, если пользоваться правилом Ловба* (рис. 7.4, в).

Сущность метода для плоскости состоит в следующем: изменение параметров может происходить только в четырех возможных направлениях — вправо, влево, вверх, вниз. Перемещения осуществляются только во взаимно перпендикулярных направлениях. Если выполняется условие $\text{Re}(\lambda_i) < 0$, то следующий шаг осуществляется с поворотом по часовой стрелке, а если $\text{Re}(\lambda_i) > 0$, то

* Дидук Г. А. Машинные методы исследования автоматических систем. Л., 1983. 175 с.

против часовой стрелки. В случае сложной конфигурации границы возможны различные прямоугольные пути движения, устанавливаемые логикой движения в одном направлении (рис. 7.4, в). В том и другом случаях проверка на устойчивость осуществляется с помощью вычисления корней уравнения (7.34) в соответствующих узлах сетки. При этом каждый раз пересчитываются коэффициенты характеристического уравнения $a_i(K_1, K_2)$.

Общим недостатком изложенных в этом параграфе методов, помимо трудностей их применения к многомерным САУ, является то обстоятельство, что в результате синтеза мы получаем лишь предварительную структуру и начальные значения параметров регулятора. При этом необходимо продолжение синтеза с учетом дополнительных критериев и ограничений, накладываемых на САУ при полных моделях неизменяемой их части. Такое «продолжение синтеза» можно свести к оптимизации параметров машинно-аналитическим методом (см. гл. 6) для конкретных САУ и специально машинными методами, которые излагаются в следующем параграфе.

§ 7.2. Машинные методы синтеза

Практическая проверка методов, изложенных в § 7.1, а также других традиционных алгоритмов синтеза показывает, что вычислительные трудности не позволяют осуществить сквозной синтез регуляторов САУ по единому функционалу качества с учетом возможностей технической реализации и условий эксплуатации САУ. Поэтому предлагается осуществлять синтез изменяемой части САУ в соответствии с процедурой, приведенной на рис. 7.5.

В таком алгоритме последовательно осуществляется синтез структуры регуляторов САУ $U = \Phi(Y, V, K, t)$ для линеаризованных ММ (3.15) неизменяемых их частей при упрощенном функционале качества $J_0 = J_0(Y, K, V, t)$ и минимуме ограничений $G_0 = G_0(Y, \Lambda, t) \leq N_0$ и оптимизация параметров САУ машинно-аналитическим методом (см. § 6.3) уже по полной ММ неизменяемой части $\dot{Y} = F(Y, \Lambda, X, U, t)$ с учетом дополнительных критериев и ограничений

$$I_1 = I_1(Y, K, V, t), \quad C_1 = C_1(Y, \Lambda, t) \leq N_1, \quad (7.35)$$

учитывающих характеристики процессов S.

Полученные в результате оптимизации искомые параметры регулятора K и V проверяются при моделировании. Алгоритм является итерационным.

В соответствии с представленной на рис. 7.5 схемой синтеза САУ начальным этапом является синтез линейных регуляторов линейных объектов. Стремление получить первое приближение регуляторов САУ в виде, наиболее близком к синтезируемому в смысле критериев (7.8) и (7.9), и охватить как непрерывные, так

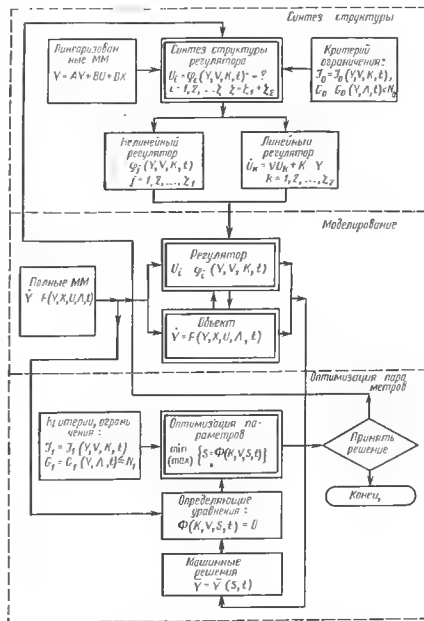


Рис. 7.5. Схема основного алгоритма синтеза САУ

и дискретные регуляторы САУ приводит к привлечению алгоритмов методов полиномиальных уравнений (7.16) — (7.19) и частотных характеристик.

Однако в ряде случаев эти алгоритмы оказываются практически неприемлемыми для синтеза многомерных САУ. Этого недостатка лишены методы пространства состояний (МПС). Они представляют собой группу машинных методов синтеза САУ на основе

формирования исходной ММ в виде (3.15). МПС разработаны в основном для линейных САУ и отличаются от других методов синтеза широкими возможностями по применению ЭВМ для их реализации. В то же время применение МПС для «ручных» расчетов САУ неэффективно.

Создание регулярных методов синтеза на основе представления исходной системы в пространстве состояний еще далеко до завершения, и на сегодняшний день существует лишь ряд способов синтеза линейных управлений линейными объектами*.

Рассмотрим основной алгоритм МПС и возможности его применения для синтеза структуры и начальных параметров регуляторов САУ. Применение метода МПС к САУ требует выполнения следующих условий: приводимости исходной линейной системы (3.7) к форме (3.15) и исключения минимальных критериев синтеза и ограничений в (7.8), (7.9).

В предположении, что эти условия выполнены, рассмотрим применение МПС по критерию минимальной длительности процессов к ММ в форме

$$\dot{Y} = AY + BU + DX, \quad Y(t_0) = Y_0, \quad (7.36)$$

получаемой как частный случай из (3.15). Переходя от этого уравнения к разностному аналогу переходу от (3.15) к (3.26), получим уравнение

$$Y[(n+1)T] = \Phi_0(T)Y(nT) + \Phi_1(T)U(nT) + \Phi_2(T)X[nT], \quad (7.37)$$

где

$$\Phi_0(T) = e^{AT}; \quad \Phi_1(T) = \int_0^T \Phi_0(-\tau) d\tau B; \quad \Phi_2(T) = \int_0^T \Phi_0(-\tau) d\tau D.$$

Следует заметить, что для дискретных систем управления величина T в (7.37) тождественна периоду дискретности. От ее выбора существенно зависят динамические характеристики синтезированной системы, требования, предъявляемые к цифровому вычислителю и исполнительному элементу.

Существует ряд способов вычислений матриц $\Phi_0(T)$, $\Phi_1(T)$, $\Phi_2(T)$, из которых наиболее эффективно их вычисление с помощью алгоритма (5.69). Основной трудностью при этом является зависимость сходимость вычислительного процесса от величины шага T , обусловленности и размерности матриц A , B , D . Если в качестве критерия синтеза принять минимальное время перехода системы из начального положения $Y[0]$ в положение $Y[N]T$ при $X(t) = 0$, то минимальное N определяется из известного соотношения

$$N \geq m/l, \quad (7.38)$$

* А. Г. Александров. Синтез регуляторов многомерных систем. — М.: Машиностроение, 1986.

где m — порядок исходной системы (7.36), а l — размерность вектора $U(nT)$. Искомое управление $U(nT)$ находят из уравнения

$$U(nT) = -\sigma(T)Y(nT), \quad n = \overline{0, N-1}, \quad (7.39)$$

которое получается в результате решения системы уравнений

$$\begin{aligned} Y(T) &= \Phi_0(T)Y(0) + \Phi_1(T)U(0); \\ Y(2T) &= \Phi_1(T)Y(T) + \Phi_1(T)U(T); \\ &\dots \dots \dots \end{aligned} \quad (7.40)$$

$$\bar{Y}(NT) = \Phi_0(T)Y[(N-1)T] + \Phi_1(T)U[(N-1)T]$$

относительно вектора

$$(U(0), U(T), \dots, U[(N-1)T]).$$

Система (7.40) получается из (7.39) при $n = \overline{0, N-1}$ и в предположении, что известна полная информация о выходных координатах системы $Y(nT)$. Тогда все дело сводится к нахождению матрицы $\sigma(T)$. Имея в виду критерий качества систем регулирования, положим в (7.40) $Y(NT) = 0$, тогда $\sigma(T)$ будет содержать первые l строк матрицы

$$S(T) = (\Phi_1(T), \Phi_1^{-1}(T)\Phi_1(T), \dots, \Phi_1^{(N-1)}(T)\Phi_1(T)^{-1}); \quad (7.41)$$

которая должна быть неособой — $|S(T)| \neq 0$.

Если l — размерность вектора U , то общее число дискретных управлений (импульсов, поступающих на исполнительный элемент) будет $k = Nl$, где N — число необходимых шагов для перевода системы из состояния $Y[0]$ в состояние $Y[NT]$. Недостатками МПС являются сравнительная сложность (при увеличении размерности системы) вычислительной процедуры и лишь частичное отражение критериев (7.8) — (7.9) в критерии метода.

Алгоритмы синтеза регуляторов ряда САУ на основе МПС для различных вариантов задания начальных условий и возмущений приведены в [2, 13].

В тех случаях, когда для синтеза структуры САУ линейные управления оказываются недостаточными для решения задач, поставленных перед САУ, приходится осуществлять синтез нелинейных регуляторов. В частности, в предыдущих методах не учитывается ограничение исполнительных устройств управления. Управления, построенные с их учетом, основаны на замечательной теореме выдающегося советского математика Л. С. Понтрягина, получившей название *принципа максимума*.

В соответствии с принципом максимума для динамической системы (7.36) с функционалом общего вида

$$J = \int_0^t f_0[Y(t), U(t)] dt \quad (7.42)$$

разработан ряд методов синтеза управления $U(t)$, переводящих систему из точки $Y(t_0)$ в точку $Y(t_k)$ таким образом, что функционал (7.42) принимает наименьшее значение, а

$$|U(t)| \leq U_{\text{доп}} \quad (7.43)$$

Так как «строгий» синтез оптимального управления $U(t)$ при условиях и ограничениях, принимаемых в проектировании САУ, не имеет практического приложения, то для машинной ориентации целесообразно воспользоваться квазиоптимальными методами синтеза нелинейных регуляторов. Достаточно эффективной оказывается машинная ориентация предложенного Л. Е. Конаревым метода последовательного синтеза управлений, оптимальных по быстродействию. Этот метод позволяет получать управление в ряде САУ, удовлетворяющее критериям (7.8), (7.9).

Сущность метода последовательного синтеза сводится к следующему: исходную систему уравнений (7.36) представим в скалярном виде

$$\left. \begin{aligned} \dot{y}_i &= \sum_{k=1}^m a_{ik} y_k + b_i u; \\ \dot{y}_{m+j} &= \sum_{k=1}^{m+j-1} a_{m+j, k} y_k; \\ i &= \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n-m}, \end{aligned} \right\} \quad (7.44)$$

где y_i — координаты системы; u_i — управляющие воздействия, которые отскакивают в виде $u_i \rightarrow u_{i\max} \operatorname{sgn} \sigma$; $u_{i\max} \leq U_{\text{доп}}$. Пусть L_m — область управляемости для системы Y_m . Тогда если синтезировано оптимальное по быстродействию управление для первого уравнения системы (7.44), а $u_m(y_1, y_2, \dots, y_m)$ и $\varphi_k^m(y_1, y_2, \dots, y_m)$ ($k = \overline{1, n}$) есть траектория, ведущая из области управляемости $y_1 \dots y_m \in D_m$ в начало координат, то оптимальное по быстродействию управление для системы $(m+1)$ порядка с точностью до знака будет

$$u_{m+1}(y_1, \dots, y_{m+1}) = \operatorname{sgn} \left[y_{m+1} - \int_0^{T_m} \sum_{k=1}^m a_{m+1, k} \varphi_k^m(y_1, \dots, y_m) dt \right]. \quad (7.45)$$

Управление (7.45) переводит в начало координат только те точки системы (7.44) из области L_{m+1} , которые подчинены условиям

$$y_{m+1} = \int_0^{T_m} \sum_{k=1}^m a_{m+1, k} \varphi_k^m(y_1, \dots, y_m) dt. \quad (7.46)$$

Соотношение (7.46) представляет собой уравнение поверхности переключения системы $\sigma(y_1, y_2, \dots, y_{m+1})$ и позволяет строить до-

статочно полную сетку точек, лежащих на этой поверхности. Вычислительная процедура по построению управления (7.45) выполняется на ЭВМ. Процедура заключается в получении таблицы точек искомой функции $\sigma(y_1, \dots, y_m)$ с числом входов, на единицу меньшим, чем порядок рассматриваемой системы. Необходимым условием реализации вычислительной процедуры является решение на ЭВМ уравнений движения неизменяемой части системы (7.44).

Пример 7.3. Синтез управлений в САР стабилизатора с ограниченными моментом стабилизирующего двигателя.

В качестве исходной пример САР, представленную в примере 6.4. Уравнения этой САР, составленные в форме Коши (3.10), имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \dot{\Omega} &= -1,27\Omega - 0,6 \cdot 10^{-3} M_{CT}(\sigma); \quad \dot{\alpha} = \Omega; \\ \dot{\beta} &= 3 \cdot 10^3 \alpha, \quad \text{где } M_{CT}(\sigma) = K_{дв} u(\sigma). \end{aligned} \right\} \quad (7.47)$$

Вначале строим управление для системы

$$\dot{\Omega} = -1,27\alpha - 0,6 \cdot 10^{-3} M_{CT}(\sigma). \quad (7.48)$$

Очевидно, в этом случае $\sigma_1 = \Omega$. Присоединяя к (7.48) второе уравнение системы (7.47), получим

$$\dot{\Omega} = -1,27\Omega - 0,6 \cdot 10^{-3} M_{CT}(\sigma_2); \quad \dot{\alpha} = \Omega. \quad (7.49)$$

С помощью ЭВМ строим зависимость

$$\Omega = f(\alpha) \quad (7.50)$$

для области управляемости $\alpha, \Omega \in L_1$. В этом случае

$$\sigma_2 = \Omega - f(\alpha), \quad M_{CT}(\sigma_2) = M_{CT\max} \operatorname{sgn} [\Omega - f(\alpha)].$$

Очевидно, что поверхность переключения в этом случае должна быть линейной, уравнению которой соответствует выражение (7.50).

Для системы (7.47) с помощью ЭВМ с точностью, достаточной для графических построений, строим табл. 7.1 координат точек поверхности переключений в фазовом пространстве системы. Значения координат β записаны внутри таблицы, две другие координаты (α и Ω) записаны во входах таблицы. По данным этой таблицы можно построить семейство кривых, получаемых в сечении поверхности переключения $\Omega = \operatorname{const}$ или $\alpha = \operatorname{const}$. Такое семейство показано на рис. 7.6. А для получения аналитического выражения оптимального управления достаточно найти уравнение поверхности переключения. Учитывая реализацию такого управления в соответствии с критериями (7.8), выбираем между точностью аппроксимации и простотой аппроксимирующего уравнения. Так как

Т а б л и ц а 7.1. Значения координаты β поверхности переключений

Координата Ω	Координата α									
	0,8	0,6	0,4	0,2	-0,01	0	0,1	0,2	0,4	0,6
0	0,35	0,23	0,125	0,045	0,016	—	-0,018	-0,045	0,125	-0,23
0,2	0,44	0,3	0,18	0,075	0,033	0,0025	0,01	-0,023	-0,096	0,18
0,4	0,56	0,4	0,26	0,125	0,07	0,023	0,008	-0,23	0,076	0,15
0,6	0,72	0,54	0,37	0,21	0,14	0,074	-0,018	0,021	0,066	0,13

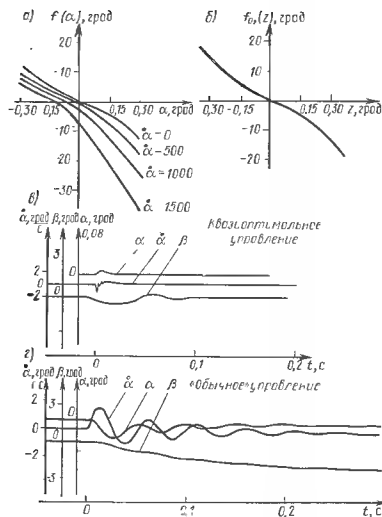


Рис. 7.6. Синтез нелинейных управлений в САР

в режиме стабилизации точка фазового пространства, изображающая состояние системы, находится в достаточно малой окрестности начала координат ($\alpha=0$, $\Omega=0$, $\beta=0$), то и точность аппроксимации должна быть наиболее высокой в этой области фазового пространства. Практически (с учетом допусков реализации) полученное семейство можно аппроксимировать уравнением

$$\beta = c_1 \Omega - f_0(\alpha + c_2 \Omega), \quad (7.51)$$

где f_0 — начальная функция, определяемая графиком, показанным на рис. 7.6, б, c_1 , c_2 — постоянные коэффициенты. Заметим, что вследствие симметричности поверхности переключения относительно начала координат достаточно рассмотреть пучок кривых, расположенных во II и IV квадрантах.

Тогда уравнение поверхности переключения примет вид

$$c_3 \beta = \beta - c_1 \Omega + f_0(\alpha + c_2 \Omega). \quad (7.52)$$

Оптимальное управление для системы (7.47) будет

$$M_{ст}(\alpha) = M_{ст, \max} \operatorname{sgn} [\beta - c_1 \Omega + f_0(\alpha + c_2 \Omega)]. \quad (7.53)$$

Поскольку из принципа действия этой САР следует, что измеряемой координатой является β , а для получения α и Ω требуются дополнительные измерители, попытаемся сформировать управление, зависящее только от β , $\dot{\beta}$, $\ddot{\beta}$.

Из третьего уравнения системы (7.47) при замене числа $3 \cdot 10^3$ на коэффициент K находим

$$\dot{\beta} = K\alpha; \quad \ddot{\beta} = K\ddot{\alpha}.$$

С учетом неидеальности получения производных закон управления стабилизирующим двигателем примет вид

$$M_{ст}(\alpha) = M_{ст, \max} \operatorname{sgn} \left[\beta - \frac{K_1}{1 + T_1 p} \ddot{\beta} + f_0 \left(-\frac{K_2}{1 + T_2 p} \dot{\beta} + \frac{K_3}{(1 + T_1 p)(1 + T_2 p)} \ddot{\beta} \right) \right]. \quad (7.54)$$

Машинное решение полной системы уравнений (7.47) с ивнооптимальным управлением (7.54) приведено на рис. 7.6, в.

На рис. 7.6, г приведено движение системы в тех же условиях и при «обычном» линейном управлении исполнительным элементом.

Машинная реализация рассмотренного метода применительно к системам высокого порядка и многомерным осуществляется инструментом САПР САУ «Синтез».

Изложенный метод синтеза нелинейных управлений наряду с преимуществами — выполнением условий $t_{пл} < t_{доп}$, $|U(t)| < |U|_{доп}$ — имеет ряд недостатков:

1) потребность в приведении исходной матрицы A в (7.36) к треугольной форме; эта операция для плохо обусловленных систем высокого порядка приводит к большим затратам машинного времени;

2) необходимость в реализации процедуры построения поверхности переключения, что связано с нарастанием погрешностей при увеличении размерности системы;

3) в функционале метода отсутствует учет внешних возмущений.

Дадим более общую постановку задачи синтеза с учетом возмущений и выведем управления, обеспечивающие одновременно оптимальность переходного процесса и инвариантность к внешним возмущениям.

Рассмотрим вновь систему (7.36), положив в ней $D=E$ и заменив размерности $n_1=n_3=n$, $m=n_2$. Тогда получим систему

$$\dot{Y} = AY + BU + X; \quad Y(0) = Y_0, \quad (7.55)$$

где $Y(t)$ и $X(t)$ — векторы параметров состояний и возмущений порядка n , непрерывные на промежутке $[0, \infty)$; для всех компонент вектора $X(t)$ соблюдается условие $N < |x_i(t)| < M$, N и M — заданные константы U — вектор-функция управлений порядка m ;

A и B — матрицы постоянных коэффициентов порядков $(n \times n)$ и $(n \times m)$ соответственно.

В (7.55) все матрицы и векторы вещественные; предполагается, что пара (A, B) управляема, т. е. среди столбцов матрицы $\|B, AB, \dots, A^{n-1}B\|$ есть n линейно независимых. В качестве функционала, обеспечивающего инвариантность системы (независимость от возмущений), принимается функционал вида

$$J_1 = \min \left\{ \frac{1}{2} \int_0^\infty (Y'PX + U_x'R_xU_x) dt \right\}, \quad Y(\infty) = 0, \quad (7.56)$$

где P — матрица знакопеременных коэффициентов размера $n \times n$;

$$P_{ij} = \text{sign}(y_i x_j), \quad (i, j = \overline{1, n}) \text{ при } y_i = 0, \quad P_{ij} = \text{sign} x_j.$$

С помощью этой матрицы обеспечивается положительность подынтегральной функции (7.56); R_x — положительная диагональная матрица весовых коэффициентов порядка $(m \times m)$. Вектор U_x (порядка m) называется *управлением по возмущению* и является составяющим вектора общего управления U , причем $U = U_0 + U_x$. В случае $|x_i(t)| \leq N$ $U_x = 0$.

Составляющая общего управления U_0 , обеспечивающая оптимальное демпфирование переходных процессов и синтезируемая по квадратичному критерию качества

$$J = \min \frac{1}{2} \left\{ \int_0^\infty (Y'QY + U_0'R_0U_0) dt \right\},$$

определяется известным образом [6, с. 220]:

$$U_0 = -R^{-1}BKY, \quad (7.57)$$

где K — положительно-определенная симметричная матрица, которая отыскивается из решения уравнения Дж. Риккати (итальянский математик, 1676—1754)

$$-KA - A'K + KBR^{-1}BK' - Q = 0. \quad (7.58)$$

В этом уравнении Q, R — заданные положительно-определенные матрицы, вычисляемые в соответствии с критериями качества (7.8), (7.9); B' — транспонированная матрица B .

Уравнение (7.58) решается путем численного интегрирования (см. гл. 5) дифференциального уравнения $\dot{K} = KA + A'K - KBR^{-1}BK' + Q$. Установившееся значение переменной K в этом систему (7.55) можно записать в виде

Для определения U_x будем использовать классический метод Лагранжа [6, с. 176], считая, что U_0 уже найдено. В этом случае систему (7.45) можно записать в виде

$$\dot{Y} = SY + BU_x + X, \quad Y(0) = Y_0, \quad (7.59)$$

где $S = A - BR^{-1}B'K$ — матрица Гурвица, т. е. матрица, собственные числа которой расположены в левой полуплоскости комплексной переменной λ уравнения $|S - \lambda E| = 0$.

Для функционала (7.56) и системы (7.59) напомним функцию Гамильтона:

$$H = \psi_0 \left(Y'PX + \frac{1}{2} U_x'R_xU_x \right) + \psi'SY + \psi'B'U_x + \psi'X, \quad (7.60)$$

где ψ — вектор-функция с элементами $\psi_1, \dots, \psi_n$, причем $\psi_0 = E$. Векторная функция $\psi(t)$ удовлетворяет системе уравнений Эйлера — Лагранжа [6]:

$$\partial\psi/\partial t = -\partial H/\partial Y. \quad (7.61)$$

Применяя к выражению (7.60) правило векторного дифференцирования, получим следующее векторное уравнение для функции ψ :

$$\dot{\psi} - \partial\psi/\partial t = -S'\psi + PX. \quad (7.62)$$

Согласно условию стационарности функции H , можно записать

$$\partial H/\partial U_x = -U_x'R_x - \psi'B' = 0. \quad (7.63)$$

Из уравнения (7.63), полагая, что матрица R_x невырожденная, получим

$$U_x = -R_x^{-1}\psi'B'. \quad (7.64)$$

В результате приходим к системе дифференциальных уравнений, из решения которой определяется искомая функция ψ :

$$\dot{Y} = SY + BR_x^{-1}\psi'B' + X; \quad \dot{\psi} = -S'\psi + PX. \quad (7.65)$$

В аналитическом виде после решения уравнений (7.65) управление (7.64) можно представить в форме

$$U_x = -R_x^{-1}B'(e^{-S'(t-t_0)}\psi_0 + \int_{t_0}^t e^{-S'(t-\tau)}PX(\tau)d\tau), \quad t_0, t \in (\infty, \infty), \quad (7.66)$$

где матрица P , являющаяся матрицей знакопеременных коэффициентов, вычисляется в процессе решения системы (7.65).

Таким образом, общий нелинейный закон управления можно представить в виде

$$U = -R^{-1}BK'Y + U_x. \quad (7.67)$$

Согласно алгоритму машинного синтеза САУ (см. рис. 7.5), следующим этапом после определения структуры и начальных параметров регулятора является параметрическая оптимизация ре-

гулятора машинно-аналитическим методом, который включает в себя процедуры оптимального поиска.

Поскольку алгоритмы машинно-аналитического метода уже рассмотрены в § 6.3, перейдем к рассмотрению процедур поиска.

Такие процедуры сводятся в общем случае к задачам нелинейного программирования. При применении известных методов нелинейного программирования, которые достаточно хорошо разработаны лишь для случаев выпуклого и, в частности, квадратичного программирования, оптимизация параметров САУ осложняется наличием дополнительных условий и ограничений, а в ряде случаев — необходимостью поиска экстремума*.

Перечислим специфические свойства, присущие целевым функциям в процедурах поиска при оптимизации параметров САУ: характеристики качества, даже для линейных систем зависят от параметров поиска нелинейно; целевая функция — неявная функция своих аргументов, как правило, имеет локальные экстремумы, «гребни», «овраги» и т. д. Отсюда следует невозможность выбора какого-либо одного метода поиска, «справляющегося» со всеми перечисленными особенностями целевых функций. Достаточно удобен поиск оптимальных параметров V, K при синтезе управлений U (рис. 7.5) в САУ на основе моделирования (см. гл. 5). В этом методе применяются два подхода: программный подход, когда исследователь по заранее составленной программе изменяет параметры V, K , «отслеживая» изменения показателя качества, и автоматический синтез с помощью оптимизатора, реализованного либо аппаратно, либо программно.

При наличии у исследователя определенного опыта и интуиции первый подход во многих случаях приводит к успеху при решении сложных задач. Естественно, что при этом должна быть достаточно совершенной методика моделирования.

Остановимся подробнее на втором подходе в случае аппаратной реализации алгоритмов оптимизации на АЦК, в составе которых имеются специальные «оптимизаторы». Принцип действия такого оптимизатора следует из рис. 7.7. В оптимизаторе аппаратуры средствами аналого-цифровой техники реализуется один из критериев качества (6.24):

$$Q = \min \max \left\{ |y_i|, \int_0^T \left[y_i^2 + K_1 \left(\frac{dy_i}{dt} \right)^2 \right] dt; \int_0^T |y_i| dt; \int_0^T f(t, \tau) y_i^2 d\tau \right\}, \quad i = \overline{1, n}, \quad y_i = y_i(t).$$

Исходная система уравнений (3.10) $\dot{Y} = F(Y, X, U, \Delta, t)$ решается многократно. В период времени между «пуском» и «оста-

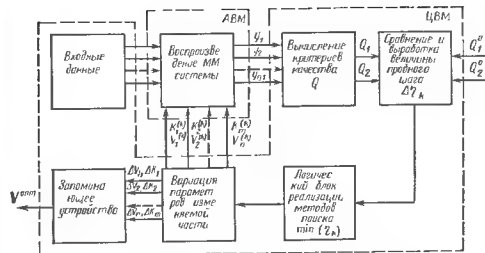


Рис. 7.7. Схема работы «оптимизатора» на АЦК

новкой» АВМ производится решение системы (3.10) при фиксированном варианте изменяемых параметров: $V^{(k)}, K^{(k)}$.

В период между «остановкой» и «возвратом к исходному положению» производится вычисление основных и дополнительных критериев качества и их отклонений от желаемых (установленных на оптимизаторе) значений Q_1^0, Q_2^0 :

$$e = K_m (Q_1 - Q_1^0); \quad \xi = K_m (Q_2 - Q_2^0),$$

где K_m — задаваемый масштаб.

Вычисляется шаг поиска минимума величины

$$\eta_k = a_1 e + \sum_{j=1}^n a_{2j} \xi_j,$$

где a_1, a_{2j} — весовые коэффициенты.

В период между «возвратом к исходному положению» и «новым «пуском» осуществляется изменение

$$V^{(k)} = (v_1^{(k)}, v_2^{(k)}, \dots, v_n^{(k)}), \quad K^{(k)} = (K_1^{(k)}, \dots, K_m^{(k)}).$$

При этом очередные значения $V^{(k)}, K^{(k)}$ фиксируются в запоминающем устройстве и по окончании поиска, когда

$$\min_{k=1}^i |\eta_k| < \eta_{\text{доп}} \quad k = \overline{1, i},$$

выдаются в виде конечного результата.

* Баттиса Д. И. Методы оптимального проектирования, М., 1984.

§ 7.3. Подсистема САПР САУ «Синтез»

Подсистема «Синтез» включает в себя соответствующие компоненты обеспечения САПР. Технические средства, методическое и организационное обеспечения совпадают с соответствующими компонентами подсистемы «Анализ». Информационные компоненты помимо ММ включают в себя набор критериев и функционалов. Программное и лингвистическое обеспечения отличаются от соответствующих компонентов подсистем САПР САУ «Моделирование», «Анализ» и других составом и содержанием операторов и большей сложностью процедур.

В основу построения подсистемы «Синтез» положена последовательность процедур синтеза, представленная на рис. 7.5. В соответствии с этой последовательностью пакеты программы «Синтез» включают наряду с пакетами программной реализации синтеза структуры и параметров регуляторов САУ соответствующие пакеты, реализующие машинно-аналитический метод, процедуры численного интегрирования, оптимизации, обработки.

ПОЯ «Синтез» разработчика САУ включает в себя набор соответствующих операторов, в том числе:
ОПРЕДЕЛИТЬ СТРУКТУРУ КОРРЕКТИРУЮЩЕГО КОНТУРА ОДНОМЕРНОЙ САУ, ЗАДАННОЙ СДУ ..., ПО КРИТЕРИЯМ ...;
ОПРЕДЕЛИТЬ ПАРАМЕТРЫ ОДНОМЕРНОЙ САУ, ЗАДАННОЙ СДУ ... С ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИЕЙ КОРРЕКТИРУЮЩЕГО КОНТУРА ... ПО КРИТЕРИЯМ ...;
ОПРЕДЕЛИТЬ СТРУКТУРУ И ПАРАМЕТРЫ КОРРЕКТИРУЮЩИХ КОНТУРОВ МНОГОМЕРНОЙ САУ, ЗАДАННОЙ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИЕЙ ... ПО КРИТЕРИЯМ ...;
ОПРЕДЕЛИТЬ СТРУКТУРУ И ПАРАМЕТРЫ АЛГОРИТМА ДИСКРЕТНОГО РЕГУЛЯТОРА ОДНОМЕРНОЙ САУ, ЗАДАННОЙ СДУ (ПФ) ... ПО КРИТЕРИЮ ...; и т. д.

Рассмотрим, в частности, построение компонентов ПОЯ «Синтез» на основе полиномиального метода (7.15)—(7.19)*. Эта составляющая ПОЯ, (будем ее называть ПОЯ «Полном») или сокращенно ПОЯ «Пол») должна обеспечивать выполнение основных операций метода: арифметические и другие операции над полиномами; факторизацию полиномов; получение преобразования Лапласа наиболее часто встречающихся временных функций; получение прямого и обратного z-преобразования; решение полиномиальных уравнений, в том числе с ограничениями на коэффициенты неизвестных полиномов; преобразование различных форм представления ММ; операции с полиномиальными матрицами.

* Солнцев Р. И., Тертерян И. М., Кане М. А. Синтез дискретных регуляторов средствами САПР/ЭВМ в проектировании и производстве, 1987, Вып. 3.

Программный компонент такого инструмента САПР реализует перечисленные и ряд других операций метода, а также осуществляет вывод результатов в виде передаточных функций, таблиц, графиков. Наличие макросредств представляет возможность создавать типовые программы для пользователей, не знакомых с конкретными алгоритмами проектирования и исследования. Программные средства пакета ПОЯ информационно совместимы с другими подсистемами САПР САУ, в частности с подсистемой «Моделирование».

Программа, написанная на ПОЯ «Пол», представляет собой последовательность операторов, которая определит алгоритм синтеза регулятора рассматриваемой САУ. Синтаксис языка в основном соответствует ПОЯ «Моделирование» (см. гл. 5). Комментарии, которые могут присутствовать в исходном тексте в любом месте, где допускается использование пробелов, облегчают документирование программ. В ПОЯ «Пол» имеется два зарезервированных идентификатора, которым присвоены фиксированные значения: S — аргумент преобразования Лапласа, Z — аргумент z-преобразования.

Существенной особенностью языка «Пол» является возможность непосредственно оперировать не только с числами, но также с полиномами и ПФ; тем самым понятие переменной в «Пол» расширено по сравнению с понятием арифметической переменной в традиционных языках программирования. Переменная представляет собой идентификатор, которому предварительно присвоено какое-либо значение. Переменные в «Пол» могут быть следующих типов: простыми переменными (значение которых есть число), полиномами (значение — полином от S или Z) или ПФ (значение — отношение двух полиномов).

Арифметические выражения состоят из последовательности операндов, знаков операций и круглых скобок. Для обозначения операции возведения в степень кроме стандартной комбинации $\star \star$ можно использовать общепринятую математическую символику. Приоритет выполнения операций определяется по обычным правилам. Операнды арифметических выражений могут быть числами, идентификаторами переменных, выражениями к встроеным функциям. Если в выражении содержатся зарезервированные идентификаторы S или Z, они воспринимаются как аргументы соответствующих полиномов. Результат вычисления выражения, вообще говоря, есть ПФ.

Встроенные функции, имеющиеся в языке, делятся на две группы. К первой из них относятся стандартные математические функции. Ко второй группе относятся специальные функции, а именно: ZT — определение z-преобразования по изображению Лапласа; ZT0 и ZT1 — осуществление z преобразования: от S — ПФ с применением экстрополаторов соответственно нулевого и первого порядка; GD — нахождение наибольшего делителя двух

или нескольких полиномов и ПФ от одинакового аргумента; FPL и FMI — факторизация полиномов или ПФ; DEC — вычисление степени полинома; REV — вычисление ПФ от обратного аргумента (1/S или 1/Z соответственно); REVC — вычисление ПФ с обратным порядком следования коэффициентов; L — выполнение преобразования Лапласа от некоторых временных функций.

Оператор присваивания служит для определения значения переменной и может записываться в одной из двух форм, например:

форма 1: $G = A * S / (1 + B * S + C * S * S * 2)$;

форма 2: $P/Q = A * S / (1 + B * S + C * S * S * 2)$.

В результате выполнения оператора в форме 1 переменной присваивается значение результата вычисления арифметического выражения, записанного справа от знака равенства (в общем случае ПФ). В результате выполнения оператора в форме 2 переменной P присваивается значение полинома числителя, а переменной Q — значение полинома знаменателя.

Такт дискретности определяется присваиванием ему значения переменной TØ. Если пользователь не устраивает изменение идентификатора TØ для этих целей, он может задать имя соответствующей переменной в операторе ТАКТ.

Звенья непрерывной части САУ, описываемые линейной системой дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, определяются с помощью оператора ДУ, например:

$$ДУ: A1 * Y1'' + B1 * Y1' - C1 * Y2 = X$$

$$A2 * Y2' - B2 * Y1 = 0$$

Полиномиальные уравнения и их системы решаются с помощью оператора ПУ, например:

$$ПУ: P * TETA + B * PI = FDL(A);$$

$$R * TETA + FMI(B) * PI = 1,$$

где TETA — идентификатор полинома Ø, а PI — П в выражении (7.19).

Средства языка позволяют задавать ограничения на коэффициенты одного из искомым полиномов.

Вывод может производиться в различных формах. Язык представляет возможности вывода нескольких графиков, при этом многочисленные параметры вывода, такие, как масштабы, относительное расположение осей и т. д., могут задаваться пользователем или определяться автоматически.

В качестве примера приведем программу на ПОЯ «Пол», предназначенную для синтеза дискретного регулятора САУ.

Пример 7.5. Синтез дискретного регулятора САУ самолета по тангажу.

СИНТЕЗ ДИСКРЕТНОГО РЕГУЛЯТОРА САУ ЛА

* ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ *

K 77[ГРАД/В]. W3-K/(5+10),

W4 (5+3.1)/(5*(5**2+2.8*5+3.24));

W0-W3*W4; ПЕЧАТЬ, W0. /* S перед ф-ция объекта */

$$W0 = \frac{4.17 \cdot 1.34 \cdot S}{S^2 + 32.4 \cdot S + 31.2 \cdot S + 12.6 \cdot S + S^4}$$

ТАКТ, TØ; TØ=0.01;

P/Q-ZTØ(W0), /* Z перед ф-ция объекта с экстрап. */

ПУ FMI(P)*TETA*(FMI(Q)*PI-1. /* решение полин.ур. (см.ур с (7.19)) */

WK FPL(Q)*TETA/(FPL(P)*PI); /* регулятор (см.ур с (7.17)) */

ПЕЧАТЬ, WK;

$$WK = \frac{4.95 \cdot 10^{-6} - 1.92 \cdot 10^{-7} * Z + 2.78 \cdot 10^{-7} * Z^2 - 1.6 \cdot 10^{-7} * Z^3 + 4.36 \cdot 10^{-6} * Z^4}{3.94 - 3.68 * Z + 4.18 * Z^2 + 3.07 * Z^3 + Z^4}$$

/* ПРОВЕРКА */

G-WK*ZTØ(W0)/(1+WK*ZTØ(W0)); ПЕЧАТЬ, G;

$$G = \frac{-1}{+2.74 \cdot 10^{-1} * Z + 1.00 * Z^2};$$

Рис. 7.8. Последовательность операций синтеза алгоритма коррекции регулятора

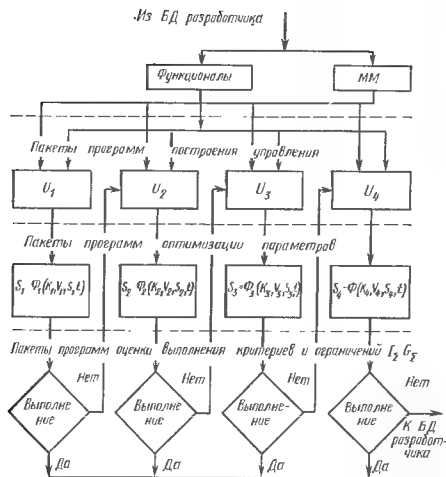


Рис. 7.9. Схема функционирования ППП «Синтеза»

Эта САУ описана в § 3.3, а ее структурная схема представлена на рис. 3.9, а. Исходные данные — передаточные функции неизменяемой части W_0 (идентификатор W_0) и их параметры — заданы в виде $W_3(p) = \frac{\kappa}{p+10}$, $W_4(p) = \frac{(p+3,1)}{p(p^2+2,8p+3,24)}$, $W_0 = W_3 \cdot W_4$, $k = 77$ град/В (идентификатор $p \rightarrow s$). Требуется синтезировать алгоритм коррекции дискретного регулятора $W_2(z)$ (идентификатор W_2) по критерию минимальной длительности переходного процесса от переменных Φ (идентификатор G).

На приведенной распечатке (рис. 7.8) представлена последовательность операций и результат синтеза алгоритма коррекции регулятора, представленный передаточной z -функцией W_K .

Функционирование пакетов программ, реализующих методы и алгоритмы синтеза (7.15) — (7.19), (7.33), (7.37) — (7.41), (7.44) — (7.46), (7.55) — (7.67), осуществляется по схеме, представленной на рис. 7.9. В табл. 7.2 показан набор синтезируемых

управлений и функционалов, включающих в себя критерии синтеза. Последовательность работы отдельных блоков определяется головной программой, которая инициирует ПП построения управлений, начиная с U_1 . В случае невыполнения критерия f_2 , G_2 головная программа «передает» следующему ППП. Полученные структура и начальные значения параметров управлений U_i , $i = 1, 4$, поступают в пакет оптимизации параметров.

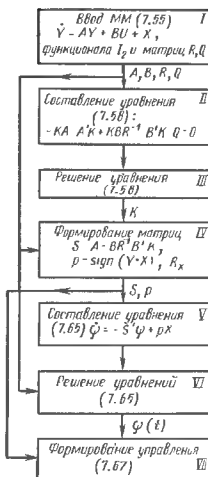
Для представления о взаимодействии модулей в ППП «Синтез» на рис. 7.10 показаны модули ППП, программно реализующего алгоритм (7.55) — (7.67).

Программные модули III и VI этого ППП осуществляют численное интегрирование уравнений (7.58), (7.65) путем взаимодействия с соответствующими ППП подсистемы «Моделирование». В дальнейшем осуществляются процедуры оптимизации параметров в соответствии с машинно-аналитическим методом (см. § 6.3). Результатирующий проектный документ содержит структуру и параметры синтезируемого регулятора САУ. На рис. 7.11 приведен такой проектный документ, изготовленный подсистемой «Синтез» для проектной процедуры синтеза дискретного регулятора «ноги» ШР.

Рис. 7.10. Последовательность модулей при построении управления

Таблица 7.2. Управления и функционалы

Функционалы	Управления
$J_1 = \min \{Y_{\text{дин}}(t), Y_{\text{стат}}(t)\}$ при ограничениях (7.8), (7.9)	$\dot{U}_1 = VU_1 + KY$
$J_2 = \min \left\{ \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (Y'AY + U_2'R_2U_2) dt \right\}$	$U_2 = -R^{-1}B'KY$
$J_3 \rightarrow \min \{t_{\text{п.н.}}\}$	$U_3 = U_{\text{max}} \text{ sign } \sigma$
$J_4 = J_2 + \min \left\{ \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (Y'PX + U_4'R_4U_4) dt \right\}$	$U_4 = U_2 + R^{-1}B'P\dot{Y}$



ЗАДАНИЕ

ОПРЕДЕЛИТЬ СТРУКТУРУ И ПАРАМЕТРЫ КОРРЕКТИРУЮЩЕГО

АЛГОРИТМА САУ "НСГИ ШР

/* Критерий-минимальная длительность переходного процесса */

* Значения параметров */

M1 1 0 : T 0 214, KSI 0 3: M 1;

/* Входное воздействие */

X-1/S;

/* Объект */

G0-1/(1+2*KSI*T*S+T**2*S**2);

ТАКТ: T0: T0-0 01;

L/R-ZT(X), /* Z изображение входа */

P/Q-ZT0(M*G0): /* Z изображение объекта с экстра -
поднятием нулевого порядка */

GZ P/Q, ПЕЧАТЬ, GZ:

$$GZ - \frac{+1 \cdot 11 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot Z}{1.03 \cdot 2 \cdot 03 \cdot Z + \frac{2}{Z}}$$

PV- FMI(P)*TETA+FMI(Q)*PI 1;

* Регулятор */

WK FPL(Q)*TETA/(PI+FPL(P)), ПЕЧАТЬ: WK;

РЕЗУЛЬТАТ:

$$WK - \frac{-9.33 \cdot 10^{-4} + 1.84 \cdot 10^{-3} \cdot Z}{1.01 + 9.39 \cdot 10^{-3} \cdot Z + \frac{2}{Z}}$$

Изм	Лист	№ докум	Подп	Дата	ПРОЕКТНАЯ ПРОЦЕДУРА				Лист
Изм	№ года	Подп	Изм	Изм	Изм	Изм	Изм	Изм	Изм
Изм	Изм	Изм	Изм	Изм	Изм	Изм	Изм	Изм	Изм

Рис. 7.11, Результатирующий проектный документ подсистемы «Синтез»

§ 8.1. Методы конструкторской разработки и их применение в САПР

Конструкторское проектирование САУ проводится в основном на этапе рабочего проектирования (см. рис. 2.4).

Конструирование представляет собой часть процесса проектирования, цель которого состоит в разработке конструкторской документации для изготовления изделия на заводе. Этот этап начинается с передачи принципиальных схем САУ, их устройств и элементов от разработчиков к конструкторам и заканчивается выдачей чертежей, технических условий, спецификаций и другой технической документации, которая поступает на производство для изготовления САУ, их устройств и элементов.

Рассматриваемые в этой и последующей главах подсистемы автоматизации конструкторского и технологического проектирования носят достаточно общий характер и применимы к проектированию различных устройств САУ (механических, электромеханических, радиоэлектронных и т. д.). В то же время ввиду более широкого применения средств САПР при проектировании электромеханических устройств (средства трехмерной графики, многооперационные технологии и т. п.) иллюстрация излагаемого материала будет проводиться применительно к электромеханическим устройствам САУ. Вопросы автоматизации конструирования радиоэлектронной аппаратуры освещены в учебном пособии [9].

Процесс конструкторского этапа проектирования и его связь с другими этапами (см. рис. 2.4) можно разбить на ряд логических связанных подэтапов.

Рассмотрим возможные методы конструкторского проектирования в соответствии с этим процессом. Каждый из подэтапов конструкторского проектирования сводится к сбору информации, оцениванию, изготовлению и выпуску технической документации.

На подэтапе функционального анализа анализируется техническое задание и расчленяются общие функции конструируемого звена САУ на единичные функции. Одновременно составляется функциональная схема конструкции звена.

Функциональный анализ проводится как для всей конструкции устройства САУ, так и для отдельных его узлов и деталей. Исходя из постановки задачи определяются технические требования, которые делятся на обязательные, минимальные и желательные. Обязательные требования включают в себя количественные параметры, допуски и дополнительные описательные характеристики, которые должны полностью обеспечиваться конструкцией. В минимальных требованиях указываются минимальные количественные параметры, которые должны обеспечиваться. Чем больше

параметры превышают минимальные значения, тем лучше конструкторские решения. Желательные требования должны по возможности учитываться в процессе конструирования. С помощью функциональной схемы конструкции отображаются взаимосвязи единичных функций, обеспечивающие выполнение общих функций конструкции.

На подэтапе разработки принципиальных решений исходя из заданных значений функций определяются принципы работы конструкции САУ и ее устройств. Одним из методов выбора конструкторского решения является метод анализа коэффициентов эффективности конструкции САУ. При этом для различных вариантов находятся коэффициенты эффективности. После оценки этих коэффициентов варианты выстраивают в ранжированной последовательности. Основой для анализа служит матрица коэффициентов эффективности. При анализе выполняются следующие операции: выбор системы целей, определение весовых коэффициентов G_{ij} , построение матрицы целей, построение матрицы оценок. Использование этого метода иллюстрируется рис. 8.1, на котором коэффициенты эффективности и значения (ЭЦ, ЗЦ) вычисляются и в соответствии с деревом целей, аналогичным рассмотренному в § 2.1.

На подэтапе определения конфигураций и размеров устройств САУ конструктор в соответствии с выбранной конструкцией устанавливает форму и габариты элементов САУ. Геометрическая форма каждого элемента описывается с помощью задания геометрических элементов (прямых, окружностей, цилиндров и т. д.) и способов их взаимного расположения.

Математические модели этих форм включают, в частности, двумерные преобразования в прямоугольной системе координат, которые могут быть выполнены на основе следующих векторно-матричных преобразований:

перенос точки $x_{i+1} = x_i + a_i$, $y_{i+1} = y_i + b_i$, что в матричной записи имеет вид

$$\begin{bmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} + T, \quad (8.1)$$

где $T = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}$ — матрица переноса;

масштабирование

$$\begin{bmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix}, \quad (8.2)$$

где S — диагональная матрица вида

$$S = \begin{bmatrix} a & 0 \\ 0 & b \end{bmatrix}. \quad (8.3)$$

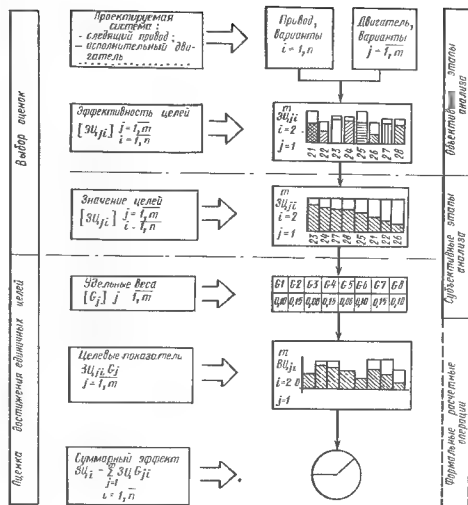


Рис. 8.1. Использование метода анализа коэффициентов эффективности

Поворот

$$\begin{bmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix},$$

где R — матрица поворота вида

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (8.4)$$

Пример 8.1. В качестве иллюстрации описанных преобразований рассмотрим исходную прямую, которая задана матрицей $L = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 2 & 4 \end{pmatrix}$. Требуется пере-

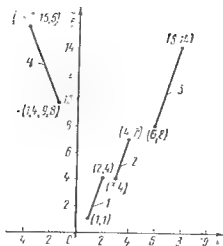


Рис. 8.2. Результат выполнения преобразований, описываемых в примере 8.1

натам x, y, z даются приращения a, b, c .

Масштабное преобразование задается матрицей

$$T = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & c \end{bmatrix}.$$

При одинаковых величинах a, b и c масштабное преобразование является линейным.

Поворот в пространстве можно определить для каждой из координатных осей. Поворот на угол θ относительно оси z осуществляется с помощью матрицы

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8.5)$$

Аналогично выполняется поворот на угол θ относительно осей y и x :

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (8.6)$$

Кроме перечисленных преобразований математические методы и алгоритмы, осуществляющие геометрические преобразования, включают в себя более сложные математические средства: кривые на плоскости и в пространстве, сплайн-аппроксимации и т. д.

нести эту прямую на две единицы $a=2$ по оси x и на три единицы $b=3$ по оси y , изменить масштабный коэффициент $m=2$ и повернуть прямую на угол $\theta=45^\circ$ относительно начала координат против часовой стрелки.

На рис. 8.2 показаны указанные операции 1, 2, 3, 4.

Для случая трехмерного преобразования матрица переноса точки имеет вид

$$T = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$$

и применяется к соответствующим координатам каждой из точек, определяющей трехмерный геометрический элемент. При этом координатам x, y, z даются приращения a, b, c .

Взаиморасположение элементов конструкции определяется ее структурой, которая в зависимости от степени детализации может быть разбита на узлы и элементы. Например, для датчика горючего ЛА (на основе ГСП) основные узлы включают в себя гиросомы, гиросел, карданы узлов, токопередающие устройства, демпфирующие устройства; «подушлы»: подшипники, валы в сборе и т. д.; отдельные детали: тела вращения и т. д. Рассматриваемый подэтап определения конфигурации и размеров связан с большим количеством расчетов, так как требуется оптимизировать форму и размеры устройств САУ. При этом конструкторские расчеты могут носить характер либо однократный, либо итерационный, повторяющийся. В первом случае надежность расчета обеспечивается введением коэффициентов запаса. Во втором производится последовательные уточнения параметров конструкции. Расчеты при конструировании проводятся с помощью инструментов САПР на основе готовых программ, реализующих, как правило, алгоритмы типа «Счет по формулам».

На подэтапе детализации определяются окончательная форма и размеры деталей, а также проводится контроль на соответствие их ГОСТам и на технологичность обработки. Результатом выполнения этого подэтапа являются чертежи, спецификации и другая конструкторская документация изделия, которые изготавливаются инструментами САПР.

Методы конструкторского проектирования можно разделить на «новое» конструирование, конструирование «по аналогу» и «вариантное» конструирование. Эти методы тесно связаны с описанными подэтапами. При «новом» конструировании необходимо выполнять все подэтапы с самого начала. Это связано с тем, что такие задачи слабо структурированы и не имеют готовых решений. Конструирование «по аналогу» осуществляется путем определения некоторых дополнительных характеристик известной конструкции. При «вариантном» конструировании принципы решения, общая функциональная схема уже полностью известны и могут варьироваться лишь в ограниченных пределах.

Применение методов конструирования для автоматизации основных операций конструкторского проектирования оказывается эффективным при рациональном использовании их в соответствующих инструментах САПР. Так, преобразования (8.1)—(8.6) реализуются с помощью пакета «Аналитические преобразования», метод анализа коэффициентов эффективности реализуется в пакете составления конструкции из элементов. Применение этих средств в инструментах САПР излагается в § 8.2, 8.3. Здесь лишь проиллюстрируем эффективность инструментов САПР на этапе конструирования в виде табл. 8.1, где приведены усредненные данные, полученные в результате анализа трудозатрат на «ручное» и «автоматизированное» проектирование конструкций ряда элементов САУ.

Таблица 8.1. Расчет затрат на чертежно-конструкторские работы при проектировании устройств и элементов САУ

Содержание работ	Затраты на работы, ч	
	ручные	автоматизированные
Изучение, проработка технического задания на конструирование	1,5	1,5
Подбор информационных материалов	3	0,3
Определение масштаба изображения	0,2	0,2
Проведение прочностного и кинематического расчетов	12	0,2
Нанесение контурного изображения:		
перечерчивание изображения с изменениями	3	0,5
перечерчивание изображения без изменений	1	0,2
Нанесение расположения составных частей:		
с изменениями	4	0,5
без изменений	2	0,2
Вычерчивание и компоновка отдельных узлов:		
с изменениями	6	0,5
без изменений	2	0,2
Нанесение номеров позиций узлов	2	0,2
Обводка чертежа	2	0,2
Заполнение подписей и штампов	1,7	0,3
Составление и заполнение таблиц спецификаций	6,0	0,2
Итого	46,4	5,2

§ 8.2. Автоматизация разработки и изготовления конструкторской документации

Одной из центральных задач применения САПР в конструировании является автоматизация разработки и изготовления конструкторской документации (КД). Блок-схема из процедур такой автоматизации показана на рис. 8.3.

Блок входной информации считывает информацию, проверяет отсутствие в ней формальных ошибок и вырабатывает данные для внутреннего отображения объекта, что требует большого объема геометрических расчетов. По внутримашинному изображению объекта блок вывода генерирует цифровые данные КД и выводит их в форме команд графопостроителю, графдисплею (ГП, ГД) или другим периферийным устройствам. Процедура управления обеспечивает возможность работы в режиме диалога для воздействия на ход обработки программ и изменения введенных ранее данных.

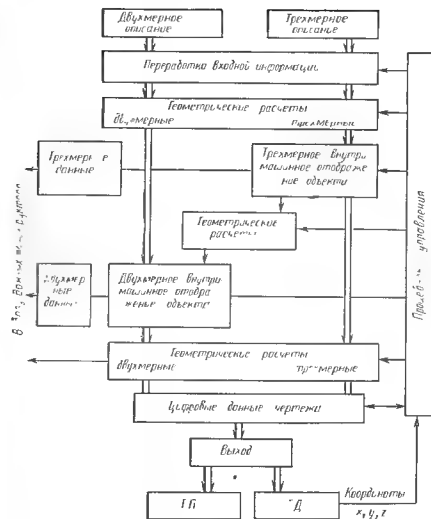


Рис. 8.3. Блок-схема автоматизации разработки и изготовления чертежей

Описание объекта, внутримашинное его отображение, цифровые данные КД записываются обычно в банк данных для последующих корректировок, модернизации, дополнений и использования в работе над другими объектами.

Входная информация состоит из полного описания объекта и формулировки поставленной задачи.

Геометрическая форма объекта задается двумерным либо трехмерным описанием. Двумерное описание выгодно для элементов электронных устройств САУ, деталей плоских и типа тел вращения или штамповки из листового материала. Двумерным описанием, кроме контура детали, задаются ее нормальные сечения. Благодаря этому генерирование внутримашинного отображения

Система ввода	Двухмерная	Трёхмерная
Основные элементы		
Неизменяемые элементы		
Элементы с меняющимися параметрами		
Элементы с меняющейся формой		

Рис. 8.4. Двумерное и трёхмерное описание деталей

деталей и проекций чертежа не требует сложного математического обеспечения. Если для описания требуется много сечений, как в случае механических устройств САУ, массив исходных данных становится громоздким и трудоёмким. Трёхмерное описание в большинстве случаев менее трудоёмко и гарантирует однозначность отображения формы объекта, но требует для генерирования внутримашинного отображения и проекций чертежа гораздо более сложного математического обеспечения.

При трёхмерном описании деталь рассматривают как набор стандартных объёмных элементов в форме прямоугольных призм,

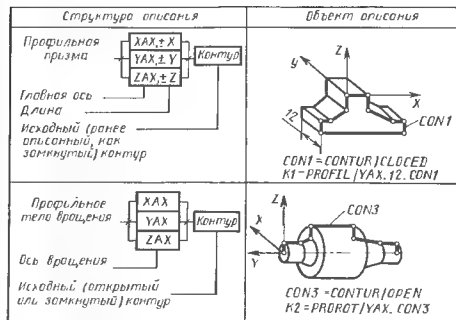


Рис. 8.5. Описание профильных элементов и тел вращения с использованием контуров:

CON1 — контур замкнутый; K1 — профиль (полюс оси X) длина 12 CON1; CON3 — контур открытый; K2 — тело вращения, ось вращения совпадает с осью Y CON3

цилиндров, конусов и комплексных элементов, часто встречающихся в деталях.

Сопоставление обоих способов описания дано на рис. 8.4. Для описания двумерных объектов обычно используются только отрезки линий и дуг окружности.

Для описания элементов и узлов конструкции САУ, как и в предыдущих инструментах проектировщиков, разрабатывается ПОЯ конструктора. Диалект такого языка, предназначенный для разработки и изготовления конструкторской документации, получил распространение под названием COMPAС*. ПОЯ COMPAС дает возможность кроме дуг и прямых описывать «упругие» линии, которые задают последовательность опорных точек. Упругими кривыми можно задавать любой контур. Контурами пользуются для описания профильных элементов брусков и тел вращения. Способ описания поясняет рис. 8.5.

Трёхмерные объекты описывают версией COMPAС.

Структура слова описания прямоугольных призм, по-разному ориентированных в системе координат элемента, видна из рис. 8.6. Структура описания цилиндра дана на рис. 8.7, описание конуса — на рис. 8.8.

* Штур Г., Краузе Ф. Л. Автоматизированное проектирование в машиностроении. М., 1986.

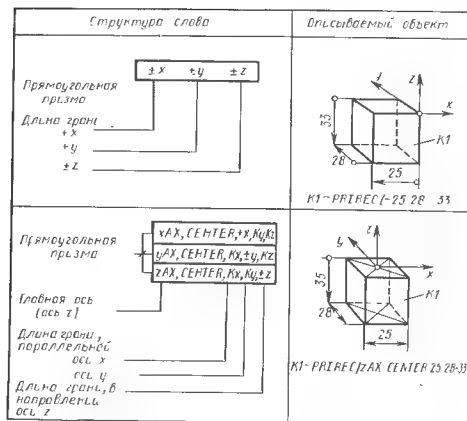


Рис. 8.6. Структура описания прямоугольных призм

Описание каждого из элементов (стандартных, контурных и тел вращения) относится к отдельной локальной координатной системе — координатной системе элемента. Для того чтобы получить комплексное отображение объекта, все составляющие его элементы нужно привести к системе координат отображения и придать им в ней нужное расположение.

Оператор необходимых для этого поступательных и вращательных переменных имеет вид

TRANSF/REF.T4.x, y, z XYROT, α_1
YZROT, α_2
ZXROT.

Содержание этого оператора: переместить T4 в точку X, Y, Z (T5) повернуть в плоскости XY на угол α_1 , в плоскости YZ на угол α_2 , что иллюстрируется рис. 8.9, где X'Y'Z' и X''Y''Z'' локальные координатные системы; XYZ абсолютная система координат.

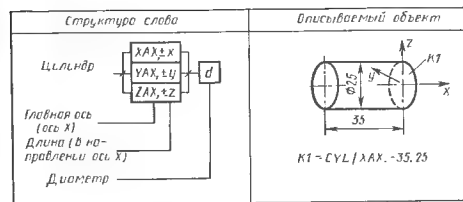


Рис. 8.7. Структура описания цилиндра

При формировании внутримашинных отображений, например токарных деталей, часто прибегают к смещению элементов вдоль одной из осей локальной системы координат до соприкосновения плоскостями контакта. Для этой операции в ПОЯ введен отдельный оператор: COAX/указать ось координат (рис. 8.10). Пакет элементов как единое физическое тело рассматривается после введения команды SOLID. Если в команде перед перечислением элементов записан идентификатор PLUS, то за целое принимают пакет из перечисленных в команде элементов, подобный собранному по команде COAX, как описано выше.

Если перед перечислением элементов стоит идентификатор MINUS, то пакет перечисленных элементов как целое вычитается из объекта, описанного перед идентификатором, или, иначе гово-

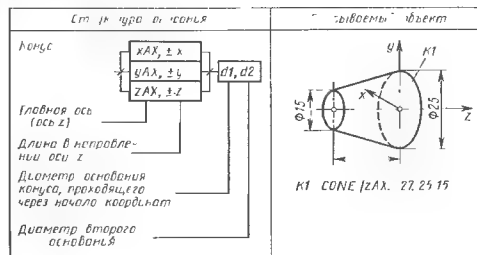


Рис. 8.8. Структура описания конуса

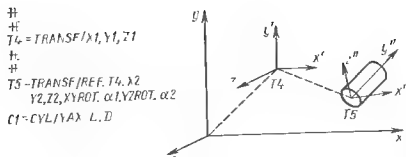


Рис. 8.9. Реализация команды TRANSF для поступательных и вращательных перемещений

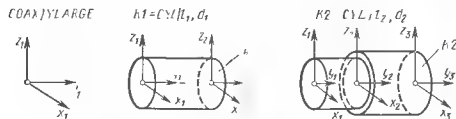
рия, подсоединяется к внешней его контактной плоскости изнутри. В этом случае получается описание отверстия.

Элементы, не имеющие общих контактных плоскостей, объединяются методом прошивания или взаимопроникивания. Этим способом можно объединить цилиндры, конусы и плоскости. Оператор такого объединения называется PENTR.

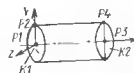
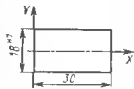
Фаски и радиусы скругления в известных пределах можно задавать как переходные между объемными элементами, внося в команду соединения контактными поверхностями SOLID идентификаторы BEVEL (фаска) и ROUND (скругление).

Для вывода из соответствующей базы данных элементов, часто встречающихся в электромеханических устройствах САУ деталей, описания составляет и заранее вводит в накопитель сам конструктор. Для этого предусмотрен оператор GETMOD.

В большинстве случаев пользуются трехмерным описанием деталей. Пример описания детали на ПОЯ COMPAC с помощью указанных операторов приведен на рис. 8.11. Деталь составляет четыре объемных элемента: прямоугольная призма V1-PRREC; профильный элемент V2 PROFIL; два цилиндра V3-CYL и V4 CYL. Элементы поступательно перемещаются (TRANSF) так, что они последовательно соприкасаются смежными плоскостями. При этом не должно возникать взаимопроникивания элементов. Оператор SOLID означает, что V1, V2 и V3 составляют единое



	X	Y	Z
P_1	0	0	0
P_2	0	9	0
P_3	30	0	0
P_4	30	9	0



283

ствах М, О, К ММ устройств САУ в большой степени представляются графовыми, табличными и геометрическими формами, разобранные выше операции анализа и синтеза чаще сводятся к операциям расчета, изменяется содержание множества критериев К. Потребуется также ПОЯ конструктора, который строится аналогично ПОЯ разработчика (см. § 4.2, 4.3, 5.3, 6.3, 7.3). При этом обслуживание конструкторов общесистемными программными средствами САПР САУ (см. § 3.4, рис. 3.14) осуществляется так же, как и разработчиков.

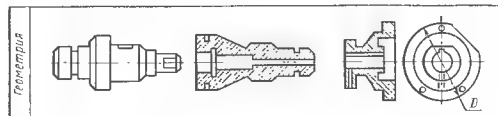
В настоящее время имеются отлаженные подсистемы САПР, позволяющие эффективно использовать ЭВМ для разработки конструкций изделий. В результате анализа таких подсистем в соответствии с приведенными в § 2.1 обобщениями проектирования механических и электромеханических устройств САУ выбрана подсистема автоматизации конструирования, разработанная в ФРГ*. Эта подсистема (будем ее называть «конструктор») представляется достаточно близкой к требованиям САПР САУ. Система вполне может быть реализована на технических средствах САПР САУ. Ее прикладное программное обеспечение (ПО) может функционировать в ОС ЕС, ОС СМ и ОС ИЭВМ. В качестве основы разработки конструкторской документации служит «проект» конструкции. Этот «проект» подготавливается с помощью САПР. Можно использовать, например, подсистемы САПР для «свободного конструирования» или для использования ранее разработанных конструкций. Для составления рабочих чертежей деталей имеются ППП DETAIL-2 (тела вращения) и DETAIL 3 (призматические детали). Сборочные чертежи подготавливаются с помощью ППП CADAD.

Составление «проекта» конструкции с помощью САПР осуществляется двумя методами: «новым» и «вариантным». Для ввода — вывода информации из базы данных (БД) по готовым элементам конструкции применяются два возможных варианта. В первом случае на соответствующем ПОЯ каждой вводной строке со ссылкой на наименование элемента и необходимые исходные параметры. Вторая форма основана на так называемой технике «меню». При этом из матрицы, содержащей все возможные элементы, выбираются такие, которые могут быть использованы для данного конструируемого узла. После выбора элемента соответствующие данные запрашиваются из БД САПР. В свою очередь, результаты разработки конкретного проекта конструкции вносятся в БД аналогичным образом.

Конструирование отдельных деталей с помощью САПР осуществляется с помощью ППП DETAIL-2, DETAIL 3. DETAIL-2

* Eversheim W., Schmeink H., Abolins G., Knauf A. Rechnerunterstützte Entwurfs und Zeichnungserstellung, im Rahmen der Auftragsabwicklung, Ind. -Auz, 1981, № 71, 30—35.

Свойства	Описание деталей	Варианты выбора стратегий, значений размеров	Признак
			Расширение (наполнение) элементов для геометрии, для технологий
			Наполнение и управление памятью (архив деталей) для повторного использования
			Вычерчивание деталей по системе Makros



Технология	Посадки/допуски	Легкость обработки поверхности	Допуски на форму, размеры, шероховатость, качество поверхности	Указания на чертежах

Рис. 8.12. К формированию диалекта ПОЯ конструктора

предусматривает ввод исходных данных на специальном диалекте ПОЯ, учитывающем специфические особенности процесса конструирования. Построение такого языка иллюстрируется на рис. 8.12.

Для описания деталей все компоненты группируют в виде последовательности: основных, вспомогательных и технологических элементов, а также системы команд. С помощью основных элементов описывают основную контур детали, вспомогательные элементы уточняют подробности. Основные и вспомогательные элементы позволяют исчерпывающе отразить геометрию детали. Технологические описания относятся как к основным, так и к вспомогательным элементам. Наполнение в памяти ЭВМ, а также изменение описаний деталей осуществляется с помощью системы команд.

Каждый описываемый элемент состоит из наименования необходимых исходных данных. Так, например, коническая поверх-

ность идентифицируется кодовым словом KONA и параметрами, включающими в себя левый и правый диаметры, а также длину конической поверхности. Аналогично происходит применение вспомогательных, технологических элементов и описаний.

Уменьшение объема входных данных достигается с помощью так называемой макротехники, при этом часто встречающиеся комбинации элементов названы конструктивным укрупнением Макто. Указанные блоки вызываются из памяти таким же образом, как и обычные элементы, и, естественно, вводятся параметры (числа, определяющие размеры).

Для уменьшения ошибок при описании деталей предусмотрен формальный контроль вводимых данных. Для каждого задаваемого элемента выполняется проверка соответствия его названия действительной геометрической форме и достаточного набора параметров чисел для однозначного описания его контура. Лишь после этого исходные данные вводятся в оперативную память.

В качестве альтернативы к алфавитно-цифровому диалогу в системе DETAIL-2 предусмотрены графические модули, которые обеспечивают визуальное отображение вводимых данных (рис. 8.13).

Кроме описанного в распоряжении конструктора находится «меню» из готовых требуемых элементов, которые вызываются на экран из памяти либо в предусмотренном системой порядке, либо в соответствии с введенными характерными координатами. Благодаря немедленному вызову на экран конструктор непрерывно наблюдает за ходом конструкторской работы САПР и может своевременно устранить выявленные ошибки в описании деталей. Кроме того, рассматриваемая система предусматривает ряд вспомогательных операций, облегчающих описание деталей на внутреннем языке. К таким операциям относятся:

- модификация элементов, изменение параметров, дополнение, стирание ошибочных элементов и т. п.;
- идентификация элементов;
- нанесение шкал, а также изменение масштаба отдельных частей изображения (windowing — наблюдение через «окно»);
- полностью автоматическое назначение размеров деталей в соответствии с избранной стратегией;
- расширение запаса элементов деталей в памяти ЭВМ осуществляется конструктором;
- построение других проекций и сечений с автоматической штриховкой.

Система DETAIL 3, позволяющая конструировать детали призматической формы, строится аналогично DETAIL-2.

Проиллюстрируем применение системы типа DETAIL-2, входящей в подсистему САПР САУ «Конструктор» при конструировании элементов САУ на примере.

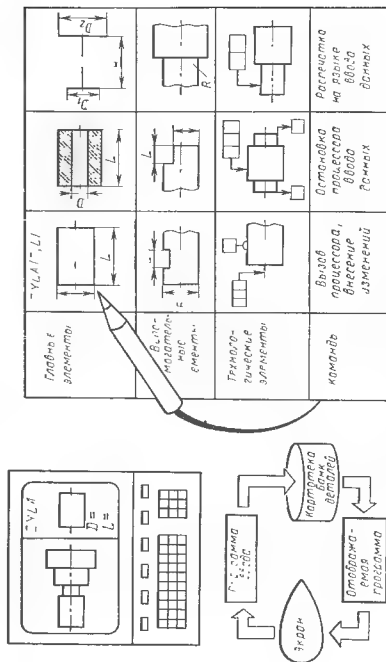


Рис. 8.13. Организация графического диалога в системе

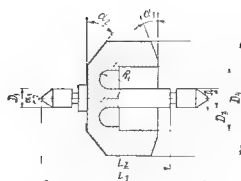


Рис. 8.14. Типовая форма ротора ГМ

(рис. 8.14).

После ввода данных назначается начало координат и по вводным данным (L_i , D_i , R_i , α_i) вычисляются массивы точек (X , Y), в которых наносится контур чертежа. Эта операция осуществляется модулем ППП изготовления чертежа «Массив».

Контур чертежа, состоящий из прямых линий и дуг окружностей, наносится модулем того же ППП «Рисунок».

Подпрограммы КОНТУР и ШТРИХ соответственно осуществляют нанесение линий и штриховку с заданными параметрами (наклоном $AL4=135^\circ$ и шагом $H=1.5$ мм).

Размеры горизонтальных, вертикальных, угловых и выносных радиусов наносятся с помощью модуля «Размер». Рамка и основная надпись (штамп) чертежа выполняются модулем «Рамка». Контур ротора ГМ выполняется тройным, а размерные линии — одним обводом пера графопостроителя. Чертеж ротора ГМ, полученный на графопостроителе рулоного типа АР 7252, представлен на рис. 8.15.

Разработка сборочных чертежей с помощью САПР осуществляется ППП CADAD подсистемы «Конструктор». Располагая общим проектом конструкции и набором чертежей деталей, с помощью САПР можно осуществить сборочный чертеж. Этот чертеж служит в первую очередь для контроля правильности назначения размеров, контроля сборки и, кроме того, используется как рабочий документ при сборке изделия на заводе. Как и в программах DETAIL-2 и DETAIL-3, в программе CADAD основой являются конструктивные элементы деталей, имеющие единую нулевую точку отсчета по осям координат поля чертежа. Нормализованные и покупные детали задаются не поэлементно, а целиком с соответствующими размерами самих деталей и указанием координат, характеризующих их положение.

Перед пуском программы CADAD описание всех деталей по определенной системе должно быть введено в память и может с помощью управляющей программы переводиться и объединяться и узлы или целиком в изделие. Обеспечивается длительное хранение в памяти элементов деталей, нормализованных деталей, что позволяет многократно использовать эти данные без повторного ввода исходных данных. Система предусматривает уточнение кон-

Пример 8.2. Изготовление чертежа ротора гидромотора ГСП (см. рис. 12) средствами САПР.

Будем исходить из того, что конструктор на основе расчетных данных и результатов компоновки конкретного гидроблока через терминал конструктора (ТК) запросил из БД типовую форму асимметричный колоколообразный ротор ГМ (рис. 8.14). Для изготовления по этой форме чертежа на ПОЯ конструктора составляется задание, на котором указываются основные, вспомогательные и технологические элементы ротора. Так, к основным элементам отнесены длины L , диаметры D ; к вспомогательным радиусы R и углы α

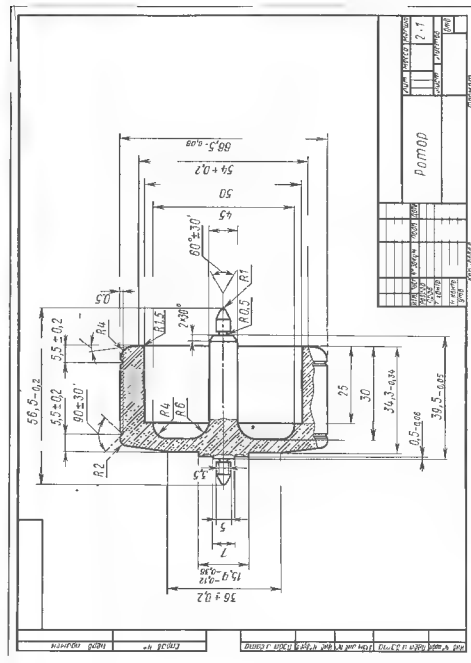


Рис. 8.15. Ротор

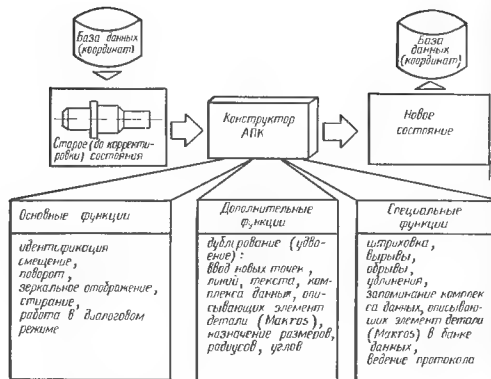


Рис. 8.16. Схема функционирования автоматизированного пульта конструктора (АПК)

туров деталей, которые первоначально из-за масштабов оказались недостаточно проработаны. Обеспечиваются построение различных сборочных проекций, сечений, а также работа в диалоговом режиме с нанесением необходимых исправлений, в том числе в чертежи отдельных деталей.

Для этой цели служит специальный терминал конструктора, функциональная схема которого изображена на рис. 8.16. Требуемые в процессе работы изображения из БД вызываются на вспомогательный экран ГД (с алфавитно-цифровой индикацией). В процессе диалога могут быть использованы блочные фрагменты конструкции, хранящиеся в «меню» готовых элементов.

ГЛАВА 9 АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ САУ

§ 9.1. Методы технологического проектирования и их применение в САПР

Задача технологического проектирования состоит в том, чтобы с помощью конструкторской документации на САУ разработать технологическую производственную документацию, на основе которой можно изготовить САУ. Результатом такого проектирования является носитель информации, из которого следует, из чего, как, в какой последовательности, чем и в какое время должны быть изготовлены элементы, устройства и «собрана» САУ. Отдельные проектные процедуры этого процесса показаны в табл. 9.1.

Таблица 9.1. Проектирование технологий

Разработка технологического маршрута	Выбор места работы	Выбор оборудования	Нормирование работ	Определение потребностей	Оценка сроков выполнения работ	Оценка производственных затрат
Расчленение изделия	Предприятия	Станки и устройства	Основное и вспомогательное время	В материалах	Запланированные сроки	На оборудование
Планирование процесса обработки	Цехи и участки	Инструменты и приспособления	Время технического и организационного обслуживания	В оборудовании	Время производственного цикла	На материалы
Планирование методов обработки	Типы рабочих мест	Специальные производственные средства	Время регламентированных перерывов	В рабочей силе		На заработную плату

Методы технологического проектирования будем рассматривать в связи с этими процедурами.

При разработке **технологического маршрута** определяются частные задачи и этапы процесса, которые необходимы для целенаправленного выполнения заданий, при этом различают микропланирование, центром которого являются методы и способы обработки, и макропланирование, представляющее, по существу, организацию логических и временных взаимосвязей отдельных этапов работ или процессов.

Под **выбором места работ** понимается определение структуры основного и вспомогательного оборудования, ориентированного

на выполнение процесса обработки. В этой процедуре выполняют два основных требования: взаимного согласования производственных систем так, чтобы обеспечить эффективную реализацию технологического процесса, и обеспечения возможных изменений с минимальными затратами.

Выбор оборудования включает в себя определение количества и качества необходимых станков, их потребности во времени и места их расположения. При этом подготавливаются необходимые мероприятия по приобретению, разработке, поддержанию в исправном состоянии и эксплуатации производственного оборудования.

Нормирование работ включает определение норм основного t_0 и вспомогательного $t_в$ времени. Проектируя любой вариант операции, технолог стремится к снижению норм времени, что достигается уменьшением t_0 и $t_в$. Возможность сокращения слагаемых основного времени связана с совершенствованием конструкций станков, качеством инструментальных материалов, правильным подбором смазочно-охлаждающей жидкости, хорошей обрабатываемостью материала детали, уменьшением припусков на обработку и уменьшением числа рабочих ходов путем повышения точности заготовок, поступающих для обработки.

Слагаемые вспомогательного времени уменьшают с помощью приспособлений с быстродействующими зажимами, путем повышения скоростей перемещения суппортов, головок столов, уменьшения числа рабочих и вспомогательных ходов при более рациональном построении технологического процесса обработки. Время технического обслуживания и время организационного обслуживания рабочего места, а также время регламентированных перерывов берут в процентах от оперативного времени $t_{оп} = t_0 + t_в$.

В проектную процедуру определения потребностей вводит определение потребностей в рабочей силе, оборудовании, материалах и информации на единицу продукции. Следует различать планирование потребности на одно изделие и определение зависящей от размеров партии потребности на период времени. Для планирования потребности на единичное изделие необходимо четкое определение этой единицы. Оно дается в операционной карте. *Операционная карта* — это проектный документ, содержащий описание технологического процесса, расчетленного на операции (установка деталей на станках, переходы и проходы обрабатывающего инструмента, режима обработки), а также оборудование и средства оснащения производства.

Потребность в количестве рабочей силы определяют на основании норм времени как времени занятости рабочих на одно изделие. Для установления квалификации используют описания процессов с учетом заработной платы. Потребность в производственном оборудовании определяется по запланированному времени на выполнение технологического процесса и типу оборудования. Пла-

нирование материалов производится по данным спецификаций или операционных карт.

Оценка сроков выполнения работ выявляет логическую временную последовательность операций, которые должны быть осуществлены для изготовления детали, узла или изделия. Планы по срокам являются местом «стыка» между разработкой технологического процесса и управлением производством. Но они не содержат данных по конкретным календарным срокам выполнения задания, а только интервалы времени, в которых начало или конец являются нулевыми точками отсчета.

Оценка производственных затрат включает в себя определение расходов на материалы, оборудование и заработную плату.

Важнейшее значение для организации технологического проектирования с помощью САПР имеет составление и ввод в базы данных САПР дескрипторного словаря типовых деталей и техно-логических операций.

Информация о повторяющихся деталях заносится в банк данных САПР и может многократно использоваться. Для поиска деталей используются их классификационные номера, при этом детали объединяются по отдельным геометрическим и технологическим признакам в группы или классы. Использование классификации при создании баз данных в банке данных (БнД) САПР дает следующие преимущества:

- обеспечивается поиск повторяющихся и типовых деталей;
- облегчается автоматизация нормировочных работ;
- уменьшается количество проектных документов, выпускаемых средствами САПР;
- ускоряется поиск стандартных технологических процессов.

Для изготовления словаря дескрипторов, кодирования информации и ввода ее в БД САПР можно использовать имеющиеся в методах конструирования и технологической подготовки производства следующие классификации*:

Ланге — Россберг, предназначенную для использования при конструировании и в производстве. Употребление ее для автоматизации технологического проектирования затруднительно из-за отсутствия кодовых обозначений;

Митрофанова, в которой разбивка на классы производится в зависимости от основного использования метода обработки. Для каждого класса определяется комплексная деталь. Используется при групповой обработке деталей. Использование для автоматизации технологического проектирования затруднительно из-за отсутствия кодовых обозначений;

— Оплица (система VDW), при которой общий спектр деталей делится на 10 классов. В каждом классе кодируются определен-

* Spur G. Konstruktionssystematik, Rechnerunterstützte Zeichnungserstellung und Arbeitsplanung. München — Wein, Carl Hanser, 1980, S. 16 — 22.

ные признаки деталей, формы наружных и внутренних поверхностей, необходимость обработки поверхностей вращения, плоских поверхностей, отверстий, зубчатых венцов и т. д. Классификация пригодна для использования при обычном конструировании и при автоматизации технологического проектирования;

— Циммермана (система ZAF⁰), в которой детали делятся на классы в зависимости от их геометрической формы. При этом выделяются основные и вспомогательные геометрические элементы. Классификация позволяет осуществлять обработку по групповой технологии. Возможно применение при автоматизации технологического проектирования;

— Туггензаммера Лутца, позволяющая кодировать размеры деталей и тип их закрепления в процессе обработки. Система содержит полное описание технологических признаков деталей. Она непригодна для конструирования, но с большим успехом может использоваться для автоматизированного составления технологии.

Применение приведенных классификаций и способов кодирования основано на методах, которые применяет технолог в своей работе.

Вариантный метод проектирования состоит в следующем. Технолог приходится выбирать наилучший, по его мнению, процесс. Для этого он сравнивает известные ему аналогичные детали — варианты — проектируемого изделия, а также средства, используемые при обработке такого аналога. Сравнивая конкретные варианты, технолог выбирает лучший.

Проектирование нужных для изготовления детали операций требует знания двух групп переменных величин. К первой группе относятся переменные, связанные с требованиями конструкторского чертежа, ко второй — связанные с возможными технологическими процессами. Обусловив эти переменные, технолог выбирает нужное для получения готовой детали сочетание процессов обработки с учетом ряда критериев. Обычно главными из них считаются себестоимость и штучное время. На выбор варианта иногда влияют и другие факторы, например загрузка оборудования, маршрут транспортирования.

Применение в автоматизации технологического проектирования вариационного метода проектирования включает в себя:

— построение в базе данных каталога вариантов технологических процессов для изготовления некоторой гаммы деталей заданном комплектом станков;

— создание ППП для оценки детали и нахождения ближайшего аналога в каталоге с выдачей соответствующих вариантов технологических процессов.

Так называемый *генераторный метод* технологического проектирования состоит из описания деталей, каталога доступных технологических процессов изготовления деталей, станков для выпол-

нения указанных процессов, создания ППП для «генерации» и совместного анализа технологического процесса изготовления детали и оборудования.

Применение САПР САУ для автоматизации проектных процедур технологического проектирования, так же как и при конструировании, следует осуществлять с учетом особенностей проектирования САУ и эффективности применения инструментов САПР для каждой проектной процедуры. Ниже приведены оценки возможности автоматизации отдельных проектных процедур, полученные на основе анализа опыта применения инструментов САПР для автоматизации технологического проектирования ряда элементов и устройств САУ.

Оценка степени автоматизации процедур технологического проектирования элементов и устройств САУ, %

Содержание работ	Степень автоматизации
1. Подготовка комплекта чертежей	20
2. Составление плана графика разработки технологической документации	20
3. Разработка технологических документов:	
3.1. Разработка маршрутной карты	50
Выбор вида заготовки	90
Определение комплексной детали для каждой группы	—
Выбор технологических баз	90
Выбор технологического оборудования и оснастки	80
Выбор основных и вспомогательных материалов	70
Проведение расчетов	75
Заполнение маршрутных карт	80
Печать	80
Контроль	—
3.2. Разработка операционной карты	45
3.3. Разработка операций технологического контроля	10
3.4. Разработка карты эскизов	10
3.5. Разработка комплектовочной карты	20
3.6. Разработка технических заданий технологической оснастки	—
3.7. Составление ведомости оснастки	60
3.8. Составление ведомости деталей к типовым технологическим процессам	70
3.9. Составление ведомости технологических документов	80
3.10. Формирование комплектов технической документации	—
4. Предъявление технической документации на нормоконтроль	—
5. Утверждение документации на технологический процесс	—
6. Предъявление документации на технологический процесс в установленном на предприятии порядке	—

Анализ приведенных оценок и результатов автоматизации других проектных процедур технологического процесса показывает, что значительная доля труда затрачивается на поиск необходимой информации о сортаменте, оборудовании, приспособлениях, инструменте, режимах резания (выбор технологических баз, оборудования и др.). Эта сфера деятельности технолога, на которую затрачивается 15-20% общего бюджета времени, почти полностью поддается автоматизации на основе создания информационно-поисковых систем технологического назначения. В значительной степени автоматизируется, как видно из приведенных оценок, разработка технологической документации.

Другой сферой деятельности технолога, поддающейся полной автоматизации, является выполнение стандартных расчетов: припусков, размерных цепей, профиля кулачков для станков автоматов, режимов резания и норм времени, расхода материала, геометрии режущего инструмента, элементов приспособлений и т. д.

К третьей сфере деятельности технолога относится решение логических задач, определяемых творческим характером его работы и слабо поддающихся формализации. К творческим задачам относят выбор маршрута, структуры, операций, баз, конструкции технологического оснащения и др. Попытки автоматизации указанных задач были успешны лишь для простых по конфигурации деталей.

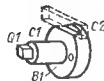
Обобщая изложенное, отметим, что преимущество применения САПР в технологическом проектировании объясняется большой скоростью расчетов, использованием методов оптимизации, возможностью осуществлять сбор производственных данных и их хранение в БД. БД позволяют сохранить традиции производства на предприятии, которые при ручной разработке технологии утрачиваются из-за текучести персонала и поэтому требуют повторной разработки.

§ 9.2. Автоматизация технологической подготовки обработки деталей

Обработка деталей механических устройств и элементов САУ, так же как и других технических систем, занимает наибольшее место в процессе технологического проектирования, поэтому покажем автоматизацию процедур и операций этой части технологического проектирования САУ. Созданное средствами автоматизации проектирования трехмерное внутримашинное отображение детали содержит все параметры, и его можно использовать для решения технологических задач обработки деталей и составления технологического маршрута.

При этом применяются два подхода.

COAX/XAX
Q1=PRIRREC/CENTER 15 20.20
C1=CYL/50.35
C2=CYL/20.80. BEVEL.XLARGE.5
COAX/NOMORE
W1=SOLID/Q1.PLUS.C1.C2.BEVEL.5



WORK/TURN
TRANSF/D.O.2B.
B1=CYL/XAX.-20.10
W2=SOLID/W1.MINUS.Q1



WORK/DRILL
TRANSF/REF.60.50.-40
F1=PRIRREC/15.20.80
W3=SOLID/W2.MINUS.F1



WORK/MILL



Рис. 9.1. Стадии обработки изделия и их внутримашинное отображение

Первый основывается на технологии направленной последовательности описания стандартных объемных элементов. Это описание дает возможность отобразить все стадии обработки изделия и генерировать их внутримашинное отображение. Описание с помощью уже рассмотренного в § 8.2 ПОЯ COMPAS готовой детали (рис. 9.1) требует прежде всего задания (см. первую группу операторов на рис. 9.1) прямоугольной призмы $Q1$ и цилиндров $C1$ и $C2$, которые объединяются между собой суммированием по оператору $SOLID$ в описании $W1$ заготовки после обточки.

Оператор $WORK/TURN$ (см. вторую группу операторов на рис. 9.1) вызывает операцию токарной обработки. Это значит, что по трем заданным элементам ЭВМ определит результирующий контур после токарной обработки.

Во второй строке описано отверстие $B1$, которое вычитается из $W1$:

В третьей группе операторов описана прямоугольная призма $F1$, представляющая собой охватывающий объем пути фрезерования. После вычитания $F1$ из $W1$ оператор $WORK/MILL$ можно использовать для управления проектированием операции фрезерования. Последовательность описания элементов детали указывает последовательность обработки. Преимущества применения здесь ПОЯ COMPAS в том, что можно наглядно описывать все

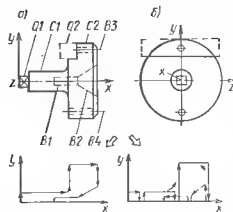


Рис. 9.2. Схема методов определения токарного контура:

а - по поверхности; б - по объемным элементам

Блоки проектирования технологического процесса используют специальные проблемно-ориентированные модели объекта, которые необходимо генерировать по внутримашинному отображению готовой детали. При этом внутримашинное отображение многократно используется, сохраняя первоначальный вид, а блоки проектирования технологического процесса не нужно изменять. Математическое обеспечение выработки проблемно-ориентированных моделей объекта немногим больше, чем при непосредственном использовании модели готовой детали. Метод использования отображения готовой детали создает базу для увязки решения технологических и конструкторских задач.

Внутримашинное отображение детали используют, в частности, для определения контура готовой детали при проектировании токарной обработки. Контур заготовки можно рассчитать по чистовому контуру, если, например, принять допущение о том, что его определяют экстремальные точки чистового контура. Определение чистового контура по трехмерной модели изделия можно осуществить двумя алгоритмами. В обоих случаях нужно прежде всего указать ось вращения, как показано на рис. 9.2. В методе определения токарного контура по объемным элементам (рис. 9.2, б) для каждого элемента в зависимости от заданной оси вращения определяется производящий контур элемента, причем учитываются и переходные элементы: фаски и радиусы сопряжения. Элементы, не лежащие на оси вращения (Q2, B3, B4), не учитываются. Элементарные контуры объединяются в результирующий

ступени обработки и получать графическое изображение заготовки после того, как она пройдет очередную ступень. Благодаря тому что в описании формы заготовки после очередной операции используется вид ее перед этой операцией, трудоемкость описания относительно невелика. Недостатки рассмотренного подхода в том, что перед описанием нужно составить технологический маршрут и ЭВМ должна содержать много отображений последовательных состояний детали, загружающих память. От этих недостатков свободен подход, базирующийся на внутримашинном отображении готовой детали*.

токарный контур. Для этого метода характерна большая нагрузка памяти, и поэтому его применяют только для простых элементов, например прямоугольной призмы, цилиндра, конуса.

Для применения метода определения контура по поверхностям (см. рис. 9.2, а) необходимо уточнение описаний поверхностей при объединении элементов. Например, поверхность, с которой цилиндр B1 переходит в коническое отверстие B2, должна быть снабжена информацией «Отверстие». Учитываются только те поверхности вращения, оси которых совпадают с заданной ранее общей осью вращения. Между поверхностями вращения могут располагаться плоскости. Предусмотрено определение того, принимают ли эти плоскости прямое и косвенное участие в формировании контура.

Простановка знаков шероховатости поверхности, резьбы и допусков не вызывает затруднений, так как внутримашинное отображение детали содержит такую информацию, отнесенную к соответствующим поверхностям.

§ 9.3. Подсистема САПР САУ «Технологическое проектирование»

Структура инструмента технолога «Технологическое проектирование» строится аналогично структуре инструментов конструктора, при этом компоненты технических средств подсистем конструктора и технолога аналогичны. Функционирование подсистемы САПР - инструмента технолога — представлено на рис. 9.3.

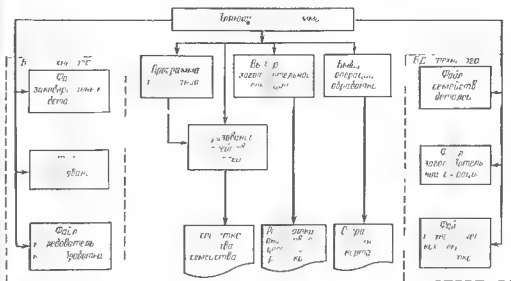


Рис. 9.3. Функциональная схема подсистемы автоматизации разработки технологической обработки деталей

* Spur G., Krause F.-L., Pistorius E., Schelp W. Geometric Modelling for Design and Technological Planning, Proceeding of the Conference on CAD/CAM, Technology in Mechanical Engineering, 24-25 März, Cambridge—Massachusetts.

Ведя диалог с пользователем, система выполняет последовательность операций с целью получения операционной карты изготовления детали:

присваивает детали кодовый номер, используя принципы групповой технологии (табл. 9.2).

Таблица 9.2. Структура кода детали

Детали некруглых форм

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Наименование детали	Материалы	Основные размеры	Отношение V/VI	Геометрические параметры и обработка																
				Окончател. форма	Наружная поверхность	Внутренние размеры						Дополнительные отверстия	Без обработки	Точность						
						Основное отверстие	Остальные отверстия													

Детали типа тел вращения

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Наименование детали	Материалы	Основные размеры	Отношение V/VI	Геометрические параметры и обработка																
				Паружная поверхность	Внутренняя поверхность	Чистота обработанной поверхности						Песцентровое отверстие	Без обработки	Точность						

определяет последовательность операций изготовления на основе геометрических особенностей детали; на этой же стадии подбирает оборудование;

включает деталь в одно из семейств или образует новое; каждое семейство имеет уникальную последовательность операций; исследует возможные технологические процессы получения заготовок (на основе выведенной информации пользователь может принять решение о покупке или собственном производстве заготовок);

разрабатывает технологию обработки каждой геометрической особенности детали; это является основной функцией системы.

Пользователь запрашивает такие параметры, как размеры, допуски, шероховатость поверхностей и т. д. ЭВМ генерирует файл из 100 оптимальных по критерию стоимости или времени обработки комбинаций режимов; распечатывает операционную карту с указанием станка, инструмента, режимов резания и т. д.

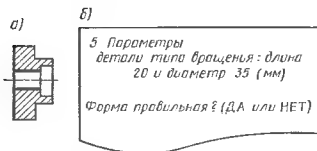


Рис. 9.4. Деталь (а) и часть схемы кодирования (б) в режиме «меню»

Ввод информации осуществляется в диалоговом режиме через терминал технолога. В основу работы системы положены принципы групповой технологии (см. § 9.1), которые позволяют составлять семейства деталей по технологическим признакам, использовать информацию для подготовки технологии обработки новой детали и перегруппировывать детали при замене оборудования.

Исходной является информация о размерах, геометрии и материале детали. Сначала детали присваивается кодовый номер, соответствующий ее форме и технологическим характеристикам. Номер детали записывается 21-значным числовым кодом, показанным в табл. 9.2.

Ввод осуществляется на версии ПОЯ COMPAS, описанном в § 8.2, или в режиме «меню», когда технолог отвечает «да» или «нет» на запросы ЭВМ и вводит числовые параметры деталей. По окончании кодирования детали технолог может утвердить или стереть полученный кодовый номер. Код детали заносится в файл или остается в оперативном запоминающем устройстве для составления технологии обработки детали. Деталь и часть схемы кодирования в режиме «меню» изображены в примере 9.1 и на рис. 9.4.

Пример 9.1. Блок кодирования

1. Класс

Детали: типа вращения? (ДА или НЕТ)

2. Функциональное назначение детали:

0 — шестерня

1 — вал, шпиндель

2 — движущаяся деталь

3 — направляющая

4 — фиксатор

5 — контейнер

6 — корпус

7 — несущая

8 — измерительная деталь

9 — вспомогательная деталь

.....
N. Деталь: направляющая

Кодовый номер 3 1 5 6 0 1 1 0 0 0 0 0 2 3 0 0 0 0 5
3 6 9 12 15 18 21

Печать G, если кодируются другие детали

x — конец кодирования;

N+1. Выбрать одно из трех:

1. Поиск семейства
2. Оставить для дальнейшего кодирования
3. Стереть

⇒ 1

Семейство деталей номер: 18

Последовательность операций: 2 50

Семейство деталей формируется по технологическим признакам. Оборудование для обработки детали выбирается на основе кодового номера по следующему алгоритму:

- определяют технологический процесс обработки в соответствии с особенностями детали;
- проверяют возможности оборудования;
- определяют сложность детали;
- деталь включают в семейство.

При выборе станка контролируют его способность обработать данную деталь. Обычно изготовление деталей типа тел вращения выполняют в следующем порядке: первая операция обработки — получение заготовки; вторая операция — чистовая обработка. На каждой стадии технологического процесса возможно применение различного оборудования в зависимости от материала детали, ее сложности и размеров. Алгоритм выбора операции обработки для различных деталей показан на рис. 9.5

В модуле выбора заготовки проводится, в частности, экономический анализ основных технологических процессов формообразования заготовок будущих деталей. Металлические заготовки из-

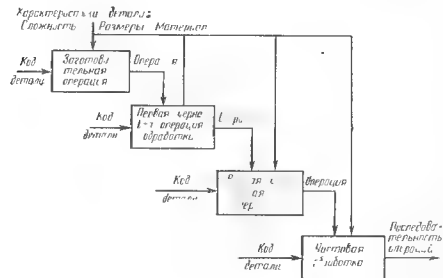


Рис. 9.5. Алгоритм выбора операций обработки для различных семейств деталей

готовляют литьем, штамповкой, прессованием, формовкой и т.д. Пластмассовые заготовки получают прессованием в форме, инжекционным прессованием, термоформовкой и т.д.

Оцениваются следующие факторы: материал детали, ее геометрия, размеры, масса, величина партии. ЭВМ исключает из рассмотрения не подходящие в данном случае технологические операции получения заготовок и описывает операции в порядке возрастания стоимости.

Расчетная формула имеет вид

$$C = [P(i, j, k) \times N] + Q(i, j), \quad (9.1)$$

где C — стоимость заготовительных операций всей партии; P — переменный коэффициент стоимости; N — размер партии; Q — постоянный коэффициент стоимости; i — индекс детали; j — индекс операции; k — индекс материала.

Ниже приведен пример описания возможных процессов получения заготовки для изготовления детали, показанной на рис. 9.4.

Пример 9.2. Описания возможных процессов получения заготовки

Модуль выбора заготовительной операции

Наименование детали: направляющая Чертеж номер: 22
Текущий кодовый номер: 315601110000023000005
Материал: сталь
Деталь типа тела вращения, глубина основного отверстия 20
Масса детали (г): 300
Размер партии — 10

Технологические процессы	Стоимость партии, приведенная к заготовительной операции, руб.	Среднее время изготовления, ч
Черновое фрезерование прутка Операции получения заготовки, подходящие для партии 10 деталей	108.88	1.58
1. Выбор нового размера партии 2. Другая деталь 3. Конец		
Размер партии — 100		
Технологические процессы	Стоимость партии, приведенная к заготовительной операции, руб.	Среднее время изготовления, ч
Обработка на токарно-револьверном станке	213.20	3.75
Черновое фрезерование прутка	278.80	15.83
Отливка в песчаную форму	269.50	3.43
Отливка в кокиль	420.00	7.50
Операции получения заготовки, подходящие для партии из 100 деталей		
1. Выбор нового размера партии		

2. Другая деталь
3. Конец

Размер партии — 1000

Технологические процессы	Стоимость партии, присвоенная к заготовительной форме, руб	Среднее время изготовления, ч
Экструзия	516 00	2 67
Обработка на токарно-винторезном автомате	602 00	5 83
Отливка в оболочковую форму	915 00	25 40
Отливка в песчаную форму	915 00	34 29
Обработка на токарно-револьверном станке	917 00	37 50
Получение отливки методом порошковой металлургии	929 00	1 13
Высадка	990 00	5 33
Ковка	1300 00	7 50
Отливка в кокиль партии 1000 деталей	1320 00	75 00
Черновое фрезерование прутка	1978 00	158 33

Заготовительные операции, подходящие для партии из 1000 деталей.

Операции расположены в порядке возрастания стоимости. На этапе выбора технологического процесса обработки детали ЭВМ выводит распечатку операционной карты. Сначала технолог заполняет заголовок карты. ЭВМ запрашивает у технолога кодовый номер детали, информацию о заготовке и материале. Вводится название детали, номер чертежа и номер семейства деталей.

Технология обработки составляется на основе геометрических особенностей детали, таких, как отверстия, плоские поверхности, канавки, поверхности, обработанные точением, зубчатые колеса и шлицы.

После выбора части детали, которая будет обрабатываться на планируемой операции технологического процесса, технолог обращается к определенным дескрипторам. ЭВМ рассчитывает скорости и подачи, выбирает инструмент и оценивает время выполнения операции. Дескрипторами являются слова, соответствующие какой либо операции, например «токарная обработка поверхности».

Подсистема САПР технолога автоматически рассчитывает такие операции наружной токарной обработки, как цилиндрическое и конусное сечение, подрезка торца, прорезка канавок и обреза. Описание остальных операций составляется вручную. Для этих операций технолог должен задать материал инструмента, критический фактор, длительность операции или ее стоимость, длину резания, начальные размеры детали, конечные размеры детали, допуски и чистоту поверхности только при чистовой обработке, ширину инструмента и глубину резания только для отрезных операций и прорезки канавок.

Подсистема САПР технолога анализирует все возможные комбинации обработки и рассчитывает лучшие сочетания, располо-

женные в порядке возрастания стоимости или продолжительности обработки. Окончательное решение остается за пользователем — технологом.

В операционную карту могут быть внесены дополнительные замечания и инструкции, которые технолог построочно вводит с пульта управления. Ввод команды «Выбор нового станка» извещает ЭВМ о том, что планирование текущей операции закончено и надо переходить к следующей.

Для иллюстрации процесса составления операционной карты выбрана деталь, показанная на рис. 9.4. При черновом точении, выполняемом на токарном станке, диаметр детали уменьшается с 44,5 до 38 мм. ЭВМ предлагает набор комбинаций режимов резания (пример 9.3).

Пример 9.3. Комбинации режимов резания

II. Черновая обработка (подача $S \leq 0.5$ мм/об)

Минимальная стоимость . . .	Лучшее сочетание .				
Скорость резания (м/мин)	Подача (мм/об)	Глубина резания, мм	Число проходов	Начальная частота вращения шпинделя, об/мин	Конечная частота вращения шпинделя, об/мин
120	0.4267	3.17500	1	860	860
Помер комбинации Ряд	(1—5) : 5				
1 120	0.4267	3.17500	1	860	860
2 114	0.4267	3.17500	1	830	830
3 109	0.4267	3.17500	1	770	
4 104	0.4267	3.17500	1		
5 100	0.4267	3.17500	1		

Дополнительная информация, комбинации на выбор

Ряд	Стоимость резца, мин	Скорость резания, м/мин	Требуемая мощность, л. с.	Время на одну штуку, мин	Стоимость за штуку	Темп выпуска
1	1256.2150	0.2520				
2	1477.3849	0				
Оптимальный выбор — третий ряд — минимальная стоимость						
Ряд	Скорость резания, м/мин	Подача, мм/об	Глубина резания, мм	Число проходов	Требуемая мощность, л. с.	Время на одну штуку, мин
3	770	0.4267	3.17500	1	15.53	5.164

В том случае, если технолог предпочел третью комбинацию режимов, она записывается в операционной карте в виде, представленном в примере 9.4.

Пример 9.4. Операционная карта

Операционная карта		Семейство № 18		Изготовлено из прутка диаметром 44,5 мм	
Деталь № 22		Кодовый номер: 315601110000023000005		Составитель карты: инициалы	
Чертеж № 22		Направляющая		Сталь	
Наименование детали:		Размеры (диаметр)		Дата составления...	
Описание операции:		Подача		Число проходов инструмента	
1 2					
Черновое точение		38.0000		770 0	
Черновое точение		25.4000		710.0	
Сверление отверстий:					
Сверление центрального отверстия		15.0000		2237 7	
Сверление остальных отверстий		15.0000		544.9	
Сверление остальных отверстий		10.0000		784.8	
Нарезание резьбы метчиком		10.0000		585 7	
Чистовое точение		36.6000		1070.0	
Чистовое точение 2 50		0.0950		1070.0	
Шлифование поверхности отверстия		0.0950		1070.0	

После обработки двух наружных ступеней детали выполняются сверление основного отверстия. Диаметры отверстий измеряются начиная с большего. Технолог, используя приведенные ниже данные, выбирает операцию начиная с диаметра № 1.

Данные для обработки отверстий

Количество ступеней отверстия=2
Диаметр № 1=15
Диаметр № 2=10
Основное отверстие диаметр № 1=15 мм
Размеры:
Допуски на диаметр: (+) = .50
 (—) = .50
Глубина ступени=10
Допуск на глубину (+ или —)=.20
Шероховатость поверхности=125.
Отклонение формы= .20
Исправления? нет
Есть ли скрутения или фаски? нет
Нарезается резьба? нет

Есть ли выступы в стенках отверстия? Нет

Спецификация данной части отверстия:

- 0 — нет переходов
- 1 — максимальный радиус
- 2 — минимальный радиус
- 3 — угол
- 0

§ 9.4. Связь подсистемы «Технологическое проектирование» с производством

Многие достижения в автоматизации проектирования и автоматизации технологических процессов связаны с числовым программным управлением (ЧПУ). В системах ЧПУ из числовых кодов формируется программа, задающая команды для обработки конкретной детали или для выполнения конкретного производственного задания; при изменении последнего меняется и управляющая программа. Написать новые программы намного легче, чем внести существенные изменения в оборудование, участвующее в технологическом процессе. Именно шагки с ЧПУ вызвали появление и развитие подсистем САПР «Технологическое проектирование». Первая демонстрация прототипа системы ЧПУ была проведена в 1952 г. в США; в 1953 г. была доказана ее потенциальная полезность*.

В функциональную систему ЧПУ входят управляющая программа, блок управления, станок или какой-либо объект управления (управляемый процесс).

Управляющая программа это подробный набор пошаговых команд, сообщаящих станку, какие действия он должен выполнять. Для операции станочной обработки последовательность таких шагов состоит из относительных движений режущего инструмента и детали. Управляющая команда закодирована в числовой или символьной форме на входном носителе и может быть воспринята устройством управления.

Блок управления обеспечивает считывание и интерпретацию команд управляющей программы и преобразование их в действия механических узлов станка. Типичные элементы обычного устройства ЧПУ — это считыватель перфоленты, буфер данных, каналы выдачи сигналов на станок, каналы обратной связи от станка и блок управления последовательностью действий для координации работы перечисленных элементов. Почти все современные системы ЧПУ в качестве блока управления используют микроЭВМ.

Сложность станков с ЧПУ меняется от простых сверлильных, управляемых от программ на перфоленте, до очень сложных обрабатывающих центров с разнообразными функциями. Впервые обрабатывающий центр с ЧПУ был введен в конце 50-х годов.

* См. ссылку на с. 23.

Системы ЧПУ широко используются в промышленности, особенно в металлообрабатывающих отраслях. Подавляющее большинство приложенных станков с ЧПУ связано с механической обработкой: фрезерованием, сверлением, расточкой, токарной обработкой, шлифованием, отрезкой.

Мелко- и среднесерийное производство, характерное для САУ и их устройств, представляет наиболее благоприятную ситуацию для применения систем ЧПУ, так как в этом случае станок можно запрограммировать один раз и сохранить эту программу для последующего использования при выполнении будущих заказов. Системы ЧПУ особенно ценны благодаря их высокой точности и повторяемости.

Помимо механической обработки металлов системы ЧПУ применяются и для других операций: штамповки, сварки, автоматического черчения, контроля, сгибания труб, газовой и плазменной дуговой резки, автоматической клеей, пайки проводов.

Функции подсистемы САПР технолога при автоматизированном формировании управляющих программ обработки деталей состоят в реализации следующих этапов: трансляции входной информации, арифметических вычислениях, расчетах смещений режущего инструмента, выполнении программы-процессора. Последовательность этих этапов и их взаимосвязь с функциями технолога и работой станка показаны на рис. 9.6.

Технолог вводит в АПД задание, написанное на языке АРТ (Automatically Programmed Tools — автоматически программируемые станки, а синтаксис тесно примыкает к синтаксису COMPAС)

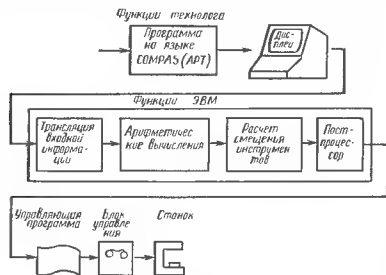


Рис. 9.6. Этапы автоматизированного формирования управляющей программы

или на каком-либо другом языке. Блок трансляции входной информации преобразует закодированные команды и данные введенной программы в форму, пригодную для использования в ЭВМ и готовую для дальнейшей машинной обработки.

Блок арифметических вычислений системы состоит из полного набора подпрограмм, необходимых для выполнения математических действий, которые нужны для построения поверхности детали. Обращение к этим подпрограммам осуществляют различные операторы языка программирования процесса обработки деталей. Арифметический блок — это основной компонент всего пакета программ автоматизированного программирования для ЧПУ. Этот блок освобождает технолога от длительных геометрических и тригонометрических расчетов.

Другая задача технолога заключается в построении траектории движения инструмента. Следует учесть, что фактическая траектория перемещения инструмента отличается от контура обрабатываемой детали, так как определяется как траектория, проходящая центром режущей части, обработку же детали осуществляет периферийная кромка режущей части инструмента. Цель расчета смещения инструмента состоит в сдвиге его траектории ввне относительно желаемой поверхности детали на величину радиуса режущей части. Это означает, что технолог в операторах программы, определяющей геометрию детали, может задавать точный ее контур. Задача расчета смещения инструмента иллюстрируется на рис. 9.7, операции 1, 2, 3, 4.

Системы станков с ЧПУ имеют неодинаковые характеристики и возможности, используют различные форматы входных данных. Почти все языки программирования обработки деталей разработаны как универсальные языки, применение которых не ограничивается управлением станками одного-двух типов, поэтому последние из задач ЭВМ при автоматизированном формировании управляющей программы состоит в том, чтобы, получив команды в общем виде, конкретизировать их специально для данного станка. Эту задачу выполняет программный блок, называемый постпроцессором.

Постпроцессор — это отдельная программа ЭВМ, которая пишется с целью подготовки управляющих носителей информации (перфокарта, магнитная лента и т.д.) для конкретного станка. Входной информацией для постпроцессора служат выходные данные информации, полученная после трех предыдущих блоков.

Эволюция технологии ЧПУ проходила в тесной связи с развитием вычислительной техники и зависела от него. Так, в совре-

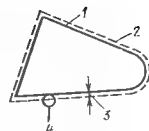


Рис. 9.7. Задача смещения режущего инструмента при составлении управляющих программ обработки деталей для контурных систем ЧПУ

менных системах прямого управления ЧПУ от ЭВМ одна большая ЭВМ используется для управления несколькими отдельными станками с ЧПУ. В такой системе нет устройств считывания с перфокарты или магнитной ленты, что позволяет избавиться от менее надежного компонента. Вместо ввода через считывающее устройство управляющая программа обработки деталей непосредственно передается станку из памяти ЭВМ. В принципе одну большую ЭВМ можно использовать для управления более чем 100 отдельными станками.

По сравнению с работой на обычных универсальных станках работа на станках с ЧПУ сильно сокращает время простоя, но сравнительно мало ускоряет сами процессы обработки. Наиболее перспективный путь к сокращению времени обработки лежит через использование станков с адаптивным управлением, которое не требует для своей реализации использования дополнительной цифровой вычислительной машины. Если в ЧПУ задается требуемая последовательность положений или траектория движения инструмента, то система адаптивного управления определяет нужные скорости резания и подачи непосредственно в процессе обработки как функцию изменения твердости материала детали, ширины или глубины резания, наличия полостей в геометрической конфигурации детали и т. п. Адаптивное управление дает возможность реагировать на эти изменения, компенсируя их в процессе обработки. Обычные ЧПУ такой возможностью не обладают.

Высшей формой автоматизации дискретного производства являются *интегрированные производственные системы*, которые называют также *гибкими производственными системами* (ГПС). Структура такой системы показана на рис. 9.8. САПР вообще и САПР САУ в частности направлены в конечном счете на получение промышленного изделия, которое на этапе своего жизненного цикла — «проектирование» — было объектом проектирования, поэтому САПР должна объединяться с ГПС в одну единую систему «проектирование — производство». Важнейшим связующим звеном такой системы является подсистема САПР «Технологическое проектирование», которая включает в себя набор инструментов технолога, частично описанных в этой главе.

В дополнение к этим инструментам на рис. 9.8 представлены инструменты технологов, осуществляющих подготовку и управление производственными процессами в СКБ завода (см. гл. 1, рис. 1.5).

Единая система автоматизации «проектирование — производство» направлена на устранение разрыва между проектированием и производством, в том числе на устранение производственных затрат на настройку, ожидание инструментов и приспособлений, простой рабочих и оборудования из-за недостатков в проектной документации.

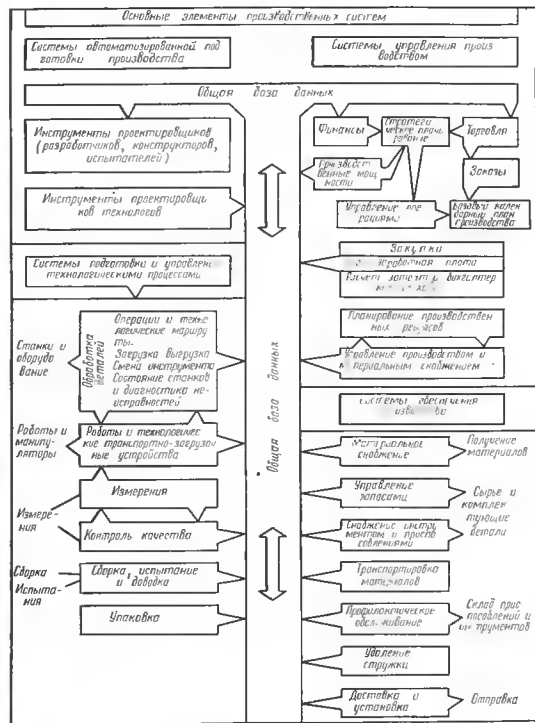


Рис. 9.8. Схема связи САПР с ГПС

гпс

Идеология единой системы «проектирование — производство» должна применяться ко всем устройствам и элементам САУ, однако с экономической точки зрения целесообразно делать такую систему для любых САУ и их устройств. На практике нужна степень гибкости, достаточная для эффективной работы по отношению к конкретным изделиям, поэтому целесообразно создание ряда интегрированных систем «проектирование — производство», предназначенных для соответствующих САУ и их устройств (например, САУ ЛА, САУ ТГ и т. д.).

ГЛАВА 10 АВТОМАТИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЯ САУ

§ 10.1. Методы испытаний САУ и их применение в САПР

Под испытаниями в процессе проектирования понимают совокупность проектных процедур, связанных с экспериментальной проверкой макетов, опытных образцов САУ и ее устройств на соответствие требованиям технического задания и с экспериментальной оценкой возможностей этих объектов проектирования. Автоматизация испытаний преследует следующие цели:

- разработка инструментов САПР САУ проектировщика — испытателя на всех этапах проектирования;
- проведение испытаний в режимах, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации САУ;
- сокращение расходов на испытания и сроков получения информации по результатам испытаний;
- проведение идентификации проектируемых САУ и их устройств;
- повышение производительности и улучшение условий труда испытателей.

Анализ процесса проектирования САУ показывает, что наибольший вес по трудоемкости и значимости имеют проектные процедуры, связанные с испытаниями макетов и опытных образцов (см. § 2.2). Возросшие требования к САУ, связанные с ростом их сложности и выполняемой функциональной нагрузки, приводят к значительному увеличению и усложнению испытаний. Достаточно отметить, что объем испытаний САУ современных ЛА на порядок превышает объем таких испытаний, проводившихся в 50-е годы. При этом наибольший вес имеют натурные испытания САУ в составе разнообразного оборудования самолетов, судов и других подвижных объектов. Аналогично состояние при испытаниях САУ ТГ, САУ ШР и др. Расходы ресурсов на натурные испытания чрезвычайно велики (построение специальных ЛА, судов для испытаний, создание специальной контрольно-измерительной аппаратуры, многочисленный персонал «испытателей» и т. д.). В со-

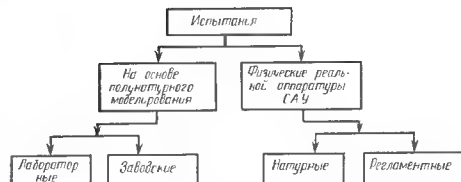


Рис. 10.1. Классификация методов испытаний САУ

ответствии с отмеченными обстоятельствами автоматизация испытаний САУ направлена на снижение затрат на испытания и исключение из них в перспективе наиболее дорогих и тяжелых проектных процедур.

Все применяемые методы испытаний можно разделить на две группы: физические испытания реальной аппаратуры (макеты, экспериментальные и опытные образцы) и испытания на основе полунатурного моделирования (рис. 10.1).

Характеристики основных типов испытаний, приведенных на третьем уровне рис. 10.1, даны в § 2.2. Способы физических испытаний реальной аппаратуры САУ существенно зависят от типа САУ и условий ее эксплуатации, а примененные средства САПР сводятся в основном к обработке результатов таких испытаний. Поэтому остановимся конкретнее на полунатурном моделировании как основным способом, используемом в подсистеме САПР САУ «Испытания». Предварительные сведения о полунатурном моделировании были уже приведены в § 5.1.

Организация испытаний САУ на основе полунатурного моделирования отвечает поэлементному комплексированию устройств в систему, так что можно провести оценку каждого из устройств в отдельности, прежде чем они будут объединены с другими. При этом схема испытаний САУ одновременно использует адекватные математические модели части элементов и устройств испытываемой САУ наряду с ее реальной аппаратурой, макетами, экспериментальными и опытными образцами.

Испытание САУ с участием в контуре управления человека, например САУ ЛА, позволяет оценить взаимодействия САУ с человеком-оператором, определить величины рабочих нагрузок на оператора, построить тренажер для обработки действий оператора. Программа летных испытаний САУ ЛА обычно на этапе ее проектирования ограничена несколькими летными экспериментами, поэтому применение полунатурного моделирования позволяет при планировании этой программы достичь оптимального распре-

деления работ между испытателями САУ ЛА с использованием моделей и натурными (летными) испытаниями. Так, по данным фирмы «Бонинг» (США), за счет полунатурного моделирования удается сократить натурные испытания на 30%.

Полунатурное моделирование САУ является на протяжении последних двух десятилетий и в настоящее время одной из определяющих проектных процедур испытаний. Это моделирование выполняется на специально разработанных динамических моделирующих комплексах (ДМК), предназначенных для испытаний САУ на всех этапах проектирования. Состав ДМК формируется в зависимости от объекта испытаний. Важным принципом,кладываемым в организацию испытаний САУ с помощью полунатурного моделирования, является принцип испытаний на основе комплексного воздействия возмущений [13].

Оценка результатов комплексных лабораторных и заводских испытаний, их устройств и элементов обычно проводится на основе суперпозиции реакций на отдельные возмущающие воздействия, такие, как удар, вибрация, качка, перегрузка, магнитные и т. д. Эти воздействия воспроизводятся при так называемых частных испытаниях. При этом весьма сложно оценить степень приближения таких испытаний к реальным условиям работы САУ, когда все возмущения действуют одновременно.

Комплексные испытания иногда проводят по схеме простого механического соединения динамических моделирующих стелдов (ДМС). Так, ДМС, имитирующий вибрацию, устанавливается на ДМС, имитирующий качку, и оба эти стелда помещаются на ДМС, имитирующий ударные воздействия. Однако в такой схеме невозможно практически оценить достоверность испытаний из-за неконтролируемого взаимодействия отдельных механических элементов испытательного оборудования и сложности соблюдения условий подобия. В то же время комплексные испытания оказываются возможными на основе ДМК. Исходным является то обстоятельство, что часть возмущающих воздействий можно задавать непосредственно в системе регулирования САУ «электрически», вызывая из памяти ЭВМ соответствующие возмущения, предварительно записанные по априорным данным, полученным при натуральных и частных испытаниях, а часть «механически» через ДМС (рис. 10.2).

Алгоритм испытаний САУ по схеме рис. 10.2 строится на основе эквивалентирования электрическими возмущениями механических, гидравлических, тепловых воздействий на устройства САУ со стороны внешней среды и внутренних источников. Применение принципа испытаний на комплексное воздействие может выявить скрытые при частных испытаниях дефекты САУ и осуществить полную имитацию внешних условий. Стандартизация таких испытательных процедур позволит решить на первых этапах проекти-

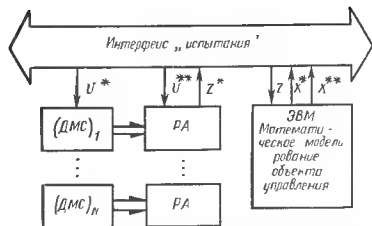


Рис. 10.2. Структурная схема комплексных испытаний САУ:

X^* — вектор сигналов, моделирующих «механическую» часть составляющих возмущений на объект через ДМС; X^{**} — вектор сигналов, моделирующих остальные составляющие возмущений «электрически»; U^* — вектор возмущений, действующих X^* , введенных в ДМС; U^{**} — вектор возмущений, действующих X^{**} , преобразованных для ввода в реальную аппаратуру (РА) САУ; Z — вектор сигналов состояния САУ

рования многие вопросы, которые в настоящее время проявляются только на стадии натуральных испытаний.

Автоматизация испытаний на основе полунатурного моделирования сводится к формированию возмущающих воздействий, задаваемых на реальную аппаратуру (РА) САУ через ДМС или вводимых в нее «электрически»; измерению сигналов о состоянии САУ, снимаемых с датчиков «промежуточных точек» САУ; сбору и накоплению данных испытаний, обработке результатов и изготовлению проектных документов по испытаниям на выходных устройствах САПР. Естественно, что последовательность этих операций регулируется управляющим алгоритмом. В отличие от предыдущих подсистем САПР САУ (см. гл. 4—9) при автоматизации испытаний необходима разработка сразу нескольких базовых инструментов испытателя:

- инструмент для формирования возмущающих воздействий;
- инструмент для обработки результатов испытаний;
- инструмент для управления испытаниями.

Из предыдущих инструментов при испытаниях применяются «Построение ММ», «Моделирование», «Анализ».

Рассмотрим основные методы и алгоритмы формирования возмущающих воздействий, которые используются в соответствующем инструменте САПР. Для формирования возмущений, поступающих на входы ДМС с ЭВМ (U^* на рис. 10.2), на которой осуществляется математическое моделирование объекта управления, приходится проводить преобразование координат. Так, при воспроизведении с помощью ДМС физической качки ЛА с боль-

шими углами разворота по курсу необходима реализация следующих алгоритмов преобразования координат в ЭВМ:

$$\psi_c = \arcsin \left(\frac{\cos \vartheta_0 \cdot \cos \psi_0}{\cos \psi_c} \right); \quad (10.1)$$

$$\vartheta_c = \arccos \left(\frac{\cos \vartheta_0 \cdot \cos \psi_0}{\cos \psi_c} \right);$$

$$\gamma_c = \arcsin \left(\frac{\cos \gamma_0 \cdot \sin \vartheta_0 \cdot \sin \psi_0 + \sin \gamma_0 \cdot \sin \psi_0}{\cos \psi_c} \right),$$

где ψ_c , ϑ_c , γ_c — углы поворота стелса; ψ_0 , ϑ_0 , γ_0 — углы поворота объекта, например углы курса, тангажа и крена ЛА, $\psi_c \neq \pi/2$.

Алгоритм формирования детерминированных испытательных воздействий в ЭВМ, составленный с учетом собственного движения ДМС, имеет вид

$$\varphi_c(t) = \varphi_{\text{вх}}(0) \dot{h}(t) + \int_0^t \Omega_{\text{вх}}(\tau) \dot{h}(t - \tau) d\tau;$$

$$\Omega_c(t) = \Omega_{\text{вх}}(0) \dot{h}(t) + \Omega_{\text{вх}}(0) \dot{h}(t) + \int_0^t h(\tau) \varepsilon_{\text{вх}}(t - \tau) d\tau; \quad (10.2)$$

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_{\text{вх}}(0) \ddot{h}(t) + \Omega_{\text{вх}}(0) \dot{h}(t) + \varepsilon_{\text{вх}}(0) \dot{h}(t) + \int_0^t \dot{h}(\tau) \dot{\varepsilon}_{\text{вх}}(t - \tau) d\tau,$$

где $\varphi_{\text{вх}}(0) = \text{const}$, $\Omega_{\text{вх}}(0) = \text{const}$, $\varepsilon_{\text{вх}}(0) = \text{const}$ — начальные значения входного сигнала на ДМС $\varphi_{\text{вх}}$, его скорости $\Omega_{\text{вх}}$ и ускорения $\varepsilon_{\text{вх}}$; $h(t)$, $\dot{h}(t)$, $\ddot{h}(t)$ — импульсная переходная функция ДМС и ее производные.

Алгоритмы формирования случайных испытательных сигналов задаются в виде многомерного случайного процесса $\varphi(t) = [\varphi_x(t), \varphi_y(t), \varphi_z(t)]$, нестационарного относительно заданных математических ожиданий

$$m_\varphi(t) = [m_x(t), m_y(t), m_z(t)], \quad (10.3)$$

дисперсий

$$D(t) = [D_x(t), D_y(t), D_z(t)] \quad (10.4)$$

и стационарного относительно нормированной корреляционной матрицы

$$R_\varphi(t) = \|R_{i,k}(\tau)\|, \quad (10.5)$$

которой соответствует заданная спектральная матрица

$$S_\varphi(j\omega) = \|S_{i,k}(j\omega)\|. \quad (10.6)$$

Согласно выражениям (10.3)–(10.6), испытательный сигнал представляется в виде

$$\left. \begin{aligned} \varphi(t) &= \varphi^0(t) + m_\varphi(t); \\ \varphi^0(t) &= \varphi_0 \sqrt{D_\varphi(t)}; \\ \varphi_0(t) &= W(j\omega) \varphi_{\text{вх}}(t); \\ S_\varphi(j\omega) &= W(j\omega) W'(-j\omega), \end{aligned} \right\} \quad (10.7)$$

где $\varphi_{\text{вх}}(t) = (\varphi_{x,\text{вх}}(t), \varphi_{y,\text{вх}}(t), \varphi_{z,\text{вх}}(t))$ — некоррелированные нормированные случайные процессы с единичной спектральной плотностью и нулевым математическим ожиданием (составляющие «белого шума»);

$W(j\omega) = \|W_{ik}\|$,³ — передаточная матрица формирующего фильтра; $\varphi_{\text{вх}}^0(t) = (\varphi_{x,\text{вх}}^0(t), \varphi_{y,\text{вх}}^0(t), \varphi_{z,\text{вх}}^0(t))$ — центрированные и нормированные случайные процессы с единичным среднеквадратичным отклонением;

$\varphi_0(t) = (\varphi_x^0(t), \varphi_y^0(t), \varphi_z^0(t))$ — центрированные случайные процессы, нестационарные относительно дисперсий, $D_\varphi(t) = (D_x(t), D_y(t), D_z(t))$.

Методы и алгоритмы обработки результатов испытаний аналогичны методам обработки при анализе САУ (см. § 6.1, 6.4) и обеспечивают определение оценок вероятностных характеристик в ДМК как нестационарных случайных процессов. Помимо обработки случайных процессов в ЦВМ реализуются рассмотренные в гл. 6 алгоритмы обработки АФЧХ и параметров переходных процессов.

Методы и алгоритмы управления испытаниями служат для управления процессами испытаний в реальном масштабе времени, т. е. в темпе работы реальной аппаратуры. Эти методы и алгоритмы включают в себя логические операции по синхронизации взаимодействия РА, ЭВМ, ДМС, различных имитаторов и преобразователей, участвующих в испытаниях. Эти методы и алгоритмы реализуются в управляющей части динамического моделирующего комплекса (ДМК), рассматриваемого в следующем параграфе.

§ 10.2. Динамический моделирующий комплекс

ДМК строится на полунатурном моделировании САУ и представляет собой аппаратно-программный комплекс, состоящий из основных компонентов подсистемы «Испытания» САПР САУ.

Для обеспечения реализации метода полунатурного моделирования и целей испытаний в ДМК используются ДМС, задатчики сигналов и имитаторы воздействий (ЗС и ИВ), АВМ, объединенная с управляющей ЦВМ, АЦВК (рис. 10.3). Таким образом, ДМК должен содержать в своем составе разнородные техниче-

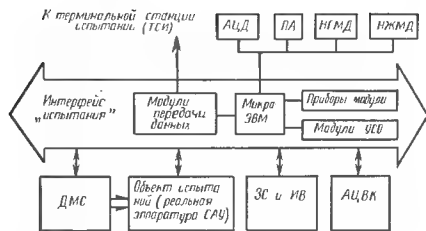


Рис. 10.3. Структура ДМК подсистемы «Испытания» САПР САУ

ские средства ЦВМ, АВМ, ДМС, ЗС и ИВ, которые взаимодействуют в процессе испытания с реальной аппаратурой САУ.

Информационную и электрическую совместимость устройств ДМК обеспечивает интерфейс «Испытания», представляющий собой совокупность унифицированных шин для передачи информации между устройствами ДМК, унифицированных сигналов и алгоритмов управляющих обменом информацией. Физическая реализация интерфейса «Испытания» осуществляется приборами модулями, объединенными через общую магистраль интерфейса и микроЭВМ, модулями устройств связи с объектом (УСО), модулями передачи данных межмашинной связи представления и хранения информации (АЦД, ПА, ГП, НГМД, НЖМД).

УСО — это комплекс специализированных модулей, осуществляющих требуемый информационный обмен между устройствами ДМК; позволяет получить в необходимом для ЭВМ виде информацию о состоянии средств и объекта испытаний (САУ). Модули УСО могут исполнять простые формы обработки информации в виде простых логических и арифметических операций и обеспечивают выработку, передачу и поддержание в необходимых пределах управляющих воздействий на средства и объект испытаний.

В настоящее время регулярные методы для полунатурного моделирования, как и стандартные ДМК, отсутствуют. Это объясняется большим разнообразием задач проектирования аппаратуры и ее эксплуатации. Все устройства, входящие в ДМК, создаются в основном на базе типовых, серийных агрегатных средств, однако, учитывая специфику САУ как объектов испытания, в ряде случаев для создания ДМК целесообразно использовать и нестандартные агрегаты и узлы. Это относится прежде всего к нестандартным ДМС, их исполнительным механизмам, узлам и агрегатам, заточкам сигналов и имитаторам, а также к первичным преобразователям (датчикам).

Основой технического обеспечения ДМК, одновременно среднего уровня подсистемы «Испытания» и ТС испытателя является управляющая мини ЭВМ. Основным видом мини-ЭВМ, выпускаемым в нашей стране, является семейство СМ ЭВМ — агрегатная система технических и программных средств ВТ, связанная с совместимостью и унификацией системных архитектурных и конструкторских решений. В семействе СМ ЭВМ входят наборы отдельных функциональных модулей (блоков), из которых komponуются управляющие вычислительные комплексы (УВК) с произвольной структурой.

Решение динамических проектных процедур испытаний САУ требует работы ЭВМ в реальном масштабе времени или даже в значительно более быстром темпе, позволяющем за короткий временной интервал получить и сравнить между собой множество решений. Существенно уменьшить время решения динамических задач при широком диапазоне частот позволяют АВМ, обладающие высоким быстродействием. Ранее были приведены характеристики АВМ. Наиболее полно требуемым характеристикам ДМК отвечает АВМ средней мощности типа АВК 32 (см. табл. 3-4).

Агрегатирование устройств ДМК осуществляется модулями УСО, построение которых определяется стандартами на интерфейс. Наибольшее распространение у нас в стране и за рубежом получили интерфейс КАМАК (ГОСТ 26.001—80), интерфейс АСУТ стандарта МЭК 625.1 Международной электротехнической комиссии (ГОСТ 26.003—80). УСО в стандарте КАМАК представляет собой модульную агрегатную систему, предназначенную для проведения косвенных, совокупных и совместных измерений аналоговых и дискретных сигналов в реальном масштабе времени по программе, находящейся в УВК на базе мини-ЭВМ СМ, первичной обработки результатов измерений, передачи их в ЭВМ и выдачи управляющих воздействий на объект в аналоговом и дискретном виде. Наименьшая конструктивная единица системы — модуль — представляет собой кассету. Кассеты размещаются в общем каркасе, называемом *крейтом*. Крейты объединяются в стойки. Состав модулей каждого крейта определяется пользователем в зависимости от условий проведения испытаний.

Рассмотрим вопросы испытаний САУ на ДМК, учитывающие особенности САУ как подвижных объектов (САУ ЛА, ПР, САР ГСП). Такие САУ обладают рядом принципиальных особенностей: случайный характер возмущающих воздействий с широким диапазоном преобладающих частот при малом количестве реализаций, большие углы прокатки основания и высокие динамическая и статическая точности.

Полунатурное моделирование САУ, как отмечалось, проводится на ДМК в реальном масштабе времени. Воспроизводимые на ДМК реальные возмущающие воздействия на САУ являются случайными процессами. Эти два обстоятельства определяют допол-

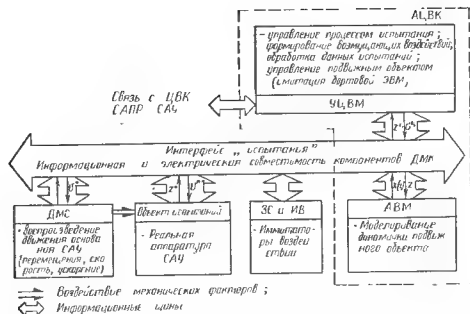


Рис. 10.4. Функциональная схема ДМК для испытаний САУ подвижных объектов

нительные требования к алгоритмам функционирования и техническим средствам ДМК. Функциональная схема ДМК для испытаний САУ подвижных объектов показана на рис. 10.4.

Аналоговая часть ДМК представлена АВМ и предназначена для формирования части возмущающих воздействий на САУ, которые определяются в результате решения уравнений движений основания.

Цифровая часть, состоящая из управляющей цифровой вычислительной машины (УЧБМ) и дискретных фильтров, предназначена для моделирования цифровых регуляторов САУ. На ее вход поступают составляющие вектора непрерывных и цифровых сигналов состояния САУ z^k , из которых формируются управления в системах стабилизации, коррекции и ориентации, например САУ ЛА, ГСП, ШР $u^k(t)$. Возмущающие воздействия на ДМС U^* формируются в соответствии с уже рассмотренным принципом испытаний САУ на комплексное воздействие возмущений.

Возможны схемы построения процесса полунатурного моделирования в замкнутом и разомкнутом контурах системы управления. Схема моделирования в замкнутом контуре является более общей. Схема моделирования в разомкнутом контуре получается из схемы, приведенной на рис. 10.4, путем размыкания связей по вектору сигналов возмущений со стороны объекта $X(t)$ и ответному вектору сигналов со стороны РА САУ $Z^*(t)$. При этом сигнал с характеристиками, соответствующими воздействию основания САУ в местах крепления последнего, вырабатывается и ЗС и ИВ.

Важнейшими элементами ДМК являются ДМС, которые механически воспроизводят движению основания. Для более полного моделирования движения основания основания САУ целесообразно применять несколько ДМС, каждый из которых решает определенные задачи.

Так, трехступенный ДМС (ДМС-I) предназначен для моделирования пространственного углового движения основания; ДМС с одной управляемой осью и тремя осями фиксированных разворотов (ДМС-II), служит для воспроизведения углового движения основания при фиксированной ориентации в пространстве вектора его мгновенной угловой скорости.

Помимо ДМС-I и ДМС-II в состав ДМК могут входить вибростенды, ударные стенды, стенды, имитирующие перегрузки, стенды климатических и других видов испытаний. Описание ДМС приведено в § 10.3.

§ 10.3. Динамические моделирующие стенды

Под ДМС понимаются технические средства САПР, предназначенные для физического воспроизведения движения основания, на котором устанавливается реальная аппаратура САУ при ее полунатурном моделировании.

Рассмотрим ДМС для воспроизведения механических возмущений на реальную аппаратуру САУ. Такие ДМС являются основными составляющими в ДМК при испытаниях САУ подвижных объектов. Характерными при испытаниях САУ подвижных объектов являются следующие возмущающие воздействия:

- 1) произвольные детерминированные и случайные воздействия в виде качки, вибрации и ударов;
- 2) возмущения, вызывающие малые (ползучие) угловые скорости объекта управления, имеющие порядок угловой скорости вращения Земли $\omega_{\min} < 10^{-4}$ рад/с.

ДМС является в общем случае многомерной САПР и включает в себя следующие звенья:

- исполнительные механизмы (устройства), обеспечивающие перемещение платформы с установленной на ней реальной аппаратурой САУ;
- датчики для измерения в общем случае текущих координат и кинематических величин (скорости, ускорения), параметров вибрации (виброперемещение, виброскорость и виброускорение);
- соответствующие следящие приводы.

В зависимости от способа преобразования энергии в исполнительном механизме стенда различают следующие типы ДМС: механический, электромеханический и гидравлический.

В частности, для воспроизведения пространственного вращения подвижного объекта (углового движения вокруг осей координат) используется ДМС, представляющий собой подвес платфор-

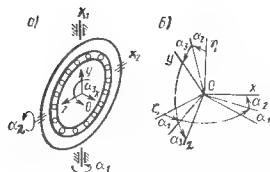


Рис. 10.5. Кинематическая схема трех-степенного ДМС

мы с исполнительными механизмами и датчиками, который обеспечивает платформе необходимое число степеней свободы. Основные характеристики таких ДМС были приведены в табл. 3.5.

ДМС I представляет собой платформу в кардановом подвесе с горизонтальной паружной осью (по отношению к поверхности Земли) с электро-механическим следящим приводом [13].

Кинематическая схема и системы координат ДМС приведены на рис. 10.5, а, б. Платформа установлена в кардановом подвесе, обеспечивающим ей свободу вращения вокруг трех ортогональных осей. На рисунке обозначены: $Oxyz$ — система координат (СК), связанная с основанием испытываемой аппаратуры САУ; $O\eta\zeta$ — земная (нирциальная) СК; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ — углы поворота ДМС вокруг наружной оси x_1 , промежуточной оси x_2 , внутренней оси x_3 . Управление осями ДМС обеспечивает электромеханический следящий привод (СП).

Структурная схема СП с комбинированным управлением показана на рис. 10.6, а, где $W_0(p)$ — передаточная функция разомкнутой некорректированной цепи; $W_{oc}(p)$ — передаточная функция обратной связи; $W_{вх}(p)$ — передаточная функция по входному воздействию $\varphi_{вх}(t)$; K_s — коэффициент усиления прямого канала. Указанные передаточные функции имеют вид

$$W_0(p) = \frac{K_0}{a_n p^n + \dots + a_1 p} = \frac{K_0}{a_0(p)};$$

$$W_{oc} = \sum_{i=1}^{n-1} \tau_i p^i; \quad W_{вх}(p) = \sum_{i=1}^n \tau_i p^i.$$

Здесь K_0 — коэффициент усиления разомкнутой схемы. Запишем передаточную функцию ошибки СП следующим образом:

$$\Phi(p) = \frac{1 - K_s W_{вх}(p) W(p)}{1 + K_s W(p)} = \frac{B(p)}{D(p)}.$$

В этом выражении $W(p)$ — передаточная функция разомкнутой скорректированной цепи.

Условие инвариантности схемы СП к внутренним для ДМС возмущающим воздействиям обеспечивается равенством нулю полинома $B(p)$. Обеспечение устойчивости и точности СП при этом проводится отдельно. Если частотный спектр случайного сигнала

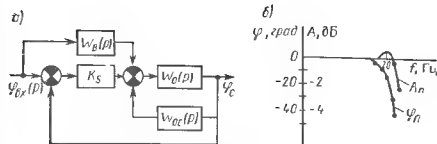


Рис. 10.6. Структурная схема и частотные характеристики привода ДМС

$\varphi_{вх}(t)$ превосходит полосу пропускаемых без искажений частот СП ДМС, то его передаточная функция в замкнутом контуре схемы моделирования может быть учтена путем построения дополнительной схемы с нулевой чувствительностью. Экспериментальные частотные характеристики замкнутого СП ДМС приведены на рис. 10.6, б.

Трехстепенной ДМС (ДМС-I) в некоторых случаях может быть заменен стендом ДМС-II [13]. Рассмотрим кинематическую схему этого стенда (рис. 10.7, а). ДМС-II имеет одну ось A , управляемую силовым следящим приводом, и три оси B, B, Γ фиксированных разворотов площадки. Благодаря указанным разворотам на оси x, y, z , связанные с площадкой ДМС, проецируются составляющие вектора угловой скорости оси A . При соответствующих фиксированных разворотах вокруг осей B, B, Γ ДМС обеспечивает воспроизведение одного, или двух, или трех координатных угловых движений площадки с реальной аппаратурой САУ.

Важным достоинством ДМС-II является возможность воспроизведения малых ползутих скоростей, которые меньше угловой скорости иращения Земли, что обеспечивает моделирование навигационных устройств САУ таких подвижных объектов, как космические аппараты и суда.

Следящий привод разворачивает динамическую часть ДМС вокруг оси A на угол $\varphi(t)$. Предварительно динамическая часть устанавливается в фиксированное положение путем ручного разворота вокруг оси B на угол $\alpha_{ББ}$, отсчитанный от оси A [при $\varphi(t) = 0$ ось B параллельна оси B]. Ось Γ перпендикулярна плоскости площадки, которая разворачивается вокруг этой оси на фиксированный угол β_0 . Оси A, B, Γ пересекаются в точке O , совпадающей с центром подвеса платформы. Начало отсчета углов $\varphi(t)$ (электрический нуль следящего привода) лежит на прямой ON , перпендикулярной осям A и B , а начало отсчета углов β_0 определяется направлением проекции OP этой прямой на плоскость платформы.

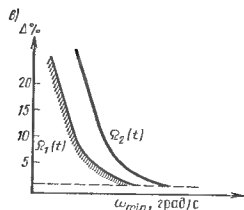
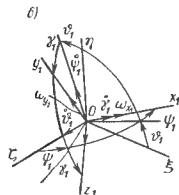
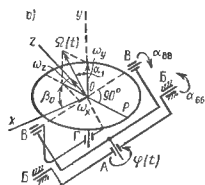


Рис. 10.7. Кинематическая схема и погрешности ДМС-II.

Выполним фиксированные развороты: динамической части ДМС — на угол α_{BB} , платформы с РА — на угол α_{BB} . При этом направление осей Ox_1 , Oy_1 , Oz_1 , связанных с платформой, выберем следующим образом: ось Oy_1 перпендикулярна плоскости платформы; ось Ox_1 лежит в плоскости платформы и составляет угол β_0 с прямой OP ; ось Oz_1 составляет с осями Oy_1 и Ox_1 правую ортогональную систему координат.

Поддадим на вход следящего привода задающее воздействие таким образом, чтобы движение управляемой оси A стэнда происходило по требуемому закону $f(t)$:

$$\ddot{\varphi}(t) = \Omega(t) = S f(t),$$

где S — коэффициент передачи.

Тогда на оси Ox_1 , Oy_1 , Oz_1 , связанные с платформой, будут проектироваться угловые скорости $\omega_{x_1}(t)$, $\omega_{y_1}(t)$, $\omega_{z_1}(t)$, равные составляющим вектора угловой скорости $\Omega(t)$ управляемой оси A :

$$\begin{aligned} \omega_{x_1}(t) &= \Omega(t) \sin \alpha_{BB} \cos \beta_0; \\ \omega_{y_1}(t) &= \Omega(t) \cos \alpha_{BB}; \\ \omega_{z_1}(t) &= \Omega(t) \sin \alpha_{BB} \sin \beta_0. \end{aligned} \quad (10.8)$$

Для определения значений углов α_{BB} , β_0 и закона изменения $\Omega(t)$ необходимо задать угловые скорости в системе координат основания РА $Oxyz$:

$$\omega_x(t) = K_1 f(t); \quad \omega_y(t) = K_2 f(t); \quad \omega_z(t) = K_3 f(t), \quad (10.9)$$

где K_1 , K_2 , K_3 — коэффициенты передачи.

Тогда, полагая

$$\omega_x(t) = \omega_{x_1}(t); \quad \omega_y(t) = \omega_{y_1}(t); \quad \omega_z(t) = \omega_{z_1}(t) \quad (10.10)$$

и подставив в выражение (10.10) соответствующие значения угло-

вых скоростей из выражений (10.8), (10.9), получим

$$\begin{aligned} \beta_0 &= \arctg \frac{K_3}{K_1}; \quad \alpha_{BB} = \frac{K_3}{K_2 \sin \beta_0}; \\ \Omega(t) &= \frac{K_3}{\cos \alpha_{BB}} f(t); \quad S = \frac{K_2}{\cos \alpha_{BB}}. \end{aligned}$$

Кроме основного достоинства ДМС-II как задатчика малых угловых скоростей следует перечислить и другие его преимущества по сравнению с ДМС-I: 1) меньший момент инерции вращающейся оси; 2) наличие одного следящего привода, при этом мощность, габаритные размеры и массы исполнительного устройства следящего привода не ограничиваются, так как он устанавливается на неподвижную в динамике часть ДМС-II.

К ограничению ДМС-II относится воспроизведение угловых движений, изменяющихся только по одинаковым законам и, кроме того, сдвинутых по фазе на 180° .

Для моделирования вибраций наибольшее распространение получили электродинамические вибростенды, на которых в принципе возможно проведение всех испытаний на вибрацию в широком диапазоне частот.

В табл. 10.1 приведены основные характеристики зарубежных и отечественных электродинамических вибростендов.

Таблица 10.1. Основные характеристики электродинамических вибростендов

Тип вибростенда	Изготовитель	Рабочий диапазон частот, Гц	Выпускающая сила, Н	Грузоподъемность, кг	Резонансная частота, Гц	Максимальное перемещение, мм
T-10000	TIW Rauenstein	10—10000	3,1	1,5	7000	—
T-4817	Brüel und Kjaer	5—10000	18,4	1,2	5200	—
A-249	Ling Electronics	5—2000	1377	1,6	—	—
ВЭДС-10	СССР	5—5000	100	1,9	4000	6
ВЭДС-400А	СССР	5—5000	4000	90	—	12,5
ВЭДС-1500	СССР	5—5000	15000	300	1850	6

Примечание. Характеристики вибростендов можно найти в книгах: 1. Ленк А., Рендиг Ю. Механические испытания приборов и аппаратов. М., 1978. 2. Испытания радиоэлектронной, электродинамической аппаратуры и испытательное оборудование. Учеб. пособие для вузов/О. П. Ганджи, А. Н. Егальчев, А. И. Коробов, Ю. В. Трезубов; Под ред. А. И. Коробова. М., 1987.

Принцип действия электродинамических вибростендов основан на взаимодействии с постоянным магнитным потоком подвижной катушки, по которой пропускается переменный ток разной частоты. Типовая конструкция электродинамического вибростенда показана на рис. 10.8.

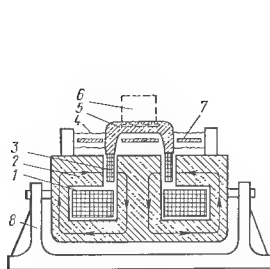


Рис. 10.8. Конструкция электродинамического вибростола

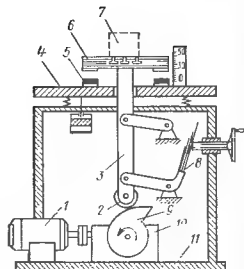


Рис. 10.9. Электромеханический ударный стенд

Вибростенд состоит из катушки подмагничивания 1, по которой протекает постоянный ток, создающий в магнитопроводе 2 постоянный магнитный поток; цилиндрической подвижной катушки 3, помещенной в воздушный зазор магнитопровода 5, на который устанавливается испытываемая аппаратура 6, жестко соединенная с подвижной катушкой и удерживаемая в требуемом положении с помощью подвесных и направляющих пружин 4; магнитного экрана 7, обеспечивающего защиту испытываемой аппаратуры от действия магнитного поля вибратора; основания 8, обеспечивающего крепление к фундаменту и возможность поворота вибратора в цапфах на угол $\pm 90^\circ$ от вертикали.

Испытания на ударные нагрузки проводят на специальных ударных стендах. Наибольшее распространение получили ударные стенды, действие которых основано на принципе торможения предварительно разогнанного до требуемой скорости тела. Типовая конструкция электромеханического ударного стенда испытаний приведена на рис. 10.9. Основными узлами такого ударного стенда являются подвижная платформа 6, тормозное устройство 5, наковальня, направляющие. Стенд работает следующим образом: электродвигатель 1 приводит во вращение кулачок 9 через редуктор 10. Кулачок через подъемный ролик 2 и толкатель 3 сообщает в соответствии с профилем кулачка возвратно-поступательное движение платформе 6, на которой жестко закреплена испытываемая аппаратура 7. Плоская пружина 8 при движении подвижной платформы вверх пружинит ее, а при резком спаде по профилю кулачка ускоряет свободное движение платформы. Поэтому максимальное ускорение при ударе в несколько раз может превышать ускорение свободного падения и иногда достигает

500*g*. Массивная наковальня 4, воспринимающая нагрузку удара, либо жестко закреплена на основание 11 стенда, что требует прочного фундамента основания, либо имеет упругий подвес, что обеспечивает установку стенда без фундамента. Форма ударного импульса формируется тормозным устройством 5 — пластинчато-прокладками из различных материалов (резины, войлока, металла, винипласта и т. д.). Частота ударов регулируется путем изменения скорости вращения вала электродвигателя.

В табл. 10.2 приведены основные характеристики зарубежных и отечественных ударных стендов различных типов.

Таблица 10.2. Основные характеристики ударных стендов

Тип стенда	Изготовитель	Способ создания ударного импульса	Длительность ударного импульса, мс	Максимальное ускорение, м-с ⁻²	Грузоподъемность, Н
T 500	TIW Ravenstein	Свободное падение	0,5 10	5000	40,78
—	Arco Shock	То же	1—80	10000	45,88
—	Montevy Research Laboratory	»	2—20	2700	91,77
УУ-500-150	СССР	Механический	40	15,3	5000
УУ-5/1000	»	»	1,5—20	102	50
УУЭ-2/200	»	Электромеханический	1,5—12	20,4	30
УУЭ-1/6000	»	»	0,1—1,0	612	10

Примечание. Характеристики ударных стендов можно найти в книгах: Ленк А., Рейтц Ю. Механические испытания приборов и аппаратов. М., 1976. Испытания радиоэлектронной, электромеханической аппаратуры и испытательное оборудование. Учеб. пособие для вузов. Ю. П. Гаубчик, А. Н. Егоров, А. И. Коробов, Ю. В. Трегубов; Под ред. А. И. Коробова. М., 1987.

§ 10.4. Подсистема САПР САУ «Испытания»

В общей структуре САПР САУ компоненты САПР, из которых формируется инструментарий испытателя — подсистема «Испытания», представлены принятой ранее трехуровневой иерархической схемой (см. рис. 3.3).

На верхнем уровне центральный вычислительный комплекс (ЦВК) обеспечивает управление подсистемой «Испытания», обработку больших массивов данных испытаний, создание базы данных подсистемы «Испытания», а также ее связь с другими подсистемами САПР САУ.

На среднем уровне находятся терминальные станции испытателей (ТСИ) на базе мини-ЭВМ. Мини-ЭВМ выполняет функции оперативного управления процессом испытания САУ, оператив-

ную обработку результатов, управление функционированием технических средств испытаний и т.д.

На третьем уровне строится проблемно-ориентированная моделирующая система динамического моделирующий комплекс (ДМК), рассмотренный в § 10.3.

Математическое обеспечение подсистемы «Испытания» строится на методах и алгоритмах, представленных в § 10.1, а также в гл. 4 - 7.

Лингвистическое обеспечение подсистемы включает прежде всего ПОЯ испытателя для организации вычислительного процесса интегрированной обработки и сложного инженерного анализа больших массивов данных испытаний САУ, а также в необходимых случаях для централизованного управления режимом испытаний. Испытатель на ПОЯ в режиме диалога при посредстве управляющей программы и на основе рассмотренного набора модулей запрашивает требуемую процедуру или последовательность процедур испытаний САУ. Затем следует выполнение сформированной проектной задачи в пошаговом или автоматическом режимах. ПОЯ испытателя включает, в частности, следующие операторы: РЕЖИМ ИСПЫТАНИЙ САУ; ВОЗМУЩАЮЩИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ; МЕТОД ПРОВЕРКИ; ОПРЕДЕЛИТЬ ДИНАМИЧЕСКИЕ ОШИБКИ УСТРОЙСТВА ... САУ ... В РЕЖИМЕ ...; ОПРЕДЕЛИТЬ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОЖИДАНИЕ И ДИСПЕРСИЮ УСТРОЙСТВА ... ПО КАНАЛУ ... САУ ... В РЕЖИМЕ ...; ПРОВЕРИТЬ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ... САУ ... В РЕЖИМЕ ...;

Характерным для программного обеспечения подсистемы является комплекс программ отображения в реальном масштабе времени на АЦД инженера-испытателя последовательности выполнения программы испытаний САУ, измеряемых и вычисляемых параметров САУ.

Прикладное ПО ДМК осуществляет: сбор данных с испытательного оборудования, объектов испытаний и запись на накопители на гибких и жестких магнитных дисках микроЭВМ, передачу полученной информации в мини-ЭВМ и прием от нее результатов оперативной обработки данных, управление исполнительными механизмами стендового оборудования. В частности, при сборе данных выбирается требуемый режим работы: среднее значение данных во время испытаний за определенный отрезок времени Δt , периодическое измерение по сигналу таймера, сбор необработанных данных за Δt и заданное число измерений n , запись данных с комментариями и без них.

Структура информационного обеспечения подсистемы «Испытания» строится на основе:

- системы организации массивов данных, необходимых для решения задач испытаний САУ на каждом иерархическом уровне подсистемы в виде соответствующих баз данных (проблемно ори-

- ентированные на нижнем уровне, для оперативного управления испытаниями и частичной обработки на среднем и для накопления, полной обработки и хранения на верхнем уровне);

- нормативно-справочных данных (общесистемные и служебные классификаторы, библиотечки справочных данных, нормы и нормативы на испытания);

- унифицированных систем документов сбора и представления данных;

- системы документооборота.

Массивы данных нижнего и среднего уровней создаются на период выполнения текущей программы испытаний САУ и по ее завершении передаются в базы данных верхнего уровня, где используются для планирования, учета и анализа результатов испытаний и других функциональных задач.

Исходными организационно-методическими документами, используемыми в подсистеме «Испытания» как компоненты методического и организационного обеспечения САПР, являются методика и программа испытаний. Методика испытаний САУ должна включать в себя: область испытаний, порядок отбора образцов, порядок представления данных испытаний, порядок обработки, оценки точности данных испытаний, правила принятия решений по результатам испытаний, требования техники безопасности и охраны окружающей среды.

Программа испытаний САУ включает в себя: описание САУ; цель и задачи испытаний; номенклатуру оцениваемых показателей качества с обоснованием их выбора; данные об условиях и месте проведения; последовательность и объем экспериментов; порядок проведения испытаний.

Применение подсистемы САПР САУ «Испытания» для определения статических и динамических характеристик САУ подвижных объектов проиллюстрируем на примере.

В качестве объекта испытаний рассмотрим испытания ГСП, в составе САУ ЛА представленной в § 4.3 (см. рис. 4.5). Все составляющие блок-схемы этой САУ, за исключением блока 8, воспроизводятся на АЦВК ДМК средствами математического моделирования (подсистема САПР САУ «Моделирование») (см. гл. 5). ГСП, осуществляющая измерение на «передачу» в БЦВМ (блок 9 на рис. 4.5) углов поворота φ , θ , γ ЛА вокруг центра тяжести, в виде реальной аппаратуры устанавливается на ДМС. Испытания проводятся средствами подсистемы САПР САУ «Испытания» в соответствии с общей схемой, представленной на рис. 10.4.

На рис. 10.10 изображена схема установки ГСП на трехступенном стенде ДМС-1. Корпус 2 трехступенного ДМС-1 устанавливается на горизонтальную опорную плиту 1 таким образом, чтобы горизонтальная ось 3 наружного кольца 10 ДМС была перпендикулярна плоскости меридиана. Исходное положение наружного кольца 10 выбирается таким, чтобы ось 8 промежуточного

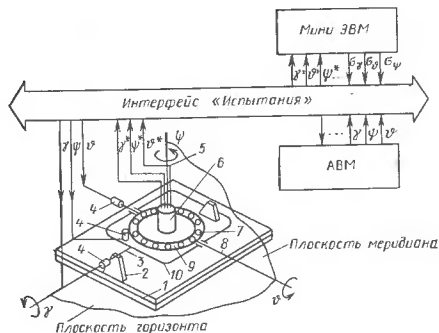


Рис. 10.10. Схема установки ГСП на ДМС-1

кольца 7 ДМС можно было расположить горизонтально, а положением промежуточного кольца 7 обеспечить горизонтальность внутреннего кольца 9. Ось вращения 5 внутреннего кольца 9 при этом ориентируется вертикально. На внутреннем кольце платформы ДМС 9 закрепляется испытуемая ГСП 6. Взаимное расположение осей ГСП по отношению к осям ДМС-1 выбирается в зависимости от кинематической схемы ГСП.

Сигналы с командных датчиков ГСП по каждой из ее осей поступают в интерфейс «Испытания» ДМК, который передает их в соответствии с предусмотренными программой испытаний САУ и алгоритмами их выполнения в различные устройства ДМК. АВМ, моделирующая уравнения динамики подвижного объекта (блоки (1) — (7), (10) на рис. 4.5), передает через интерфейс «Испытания» на входы следящих приводов (4) ДМС-1 сигналы, задающие возмущающие воздействия, моделирующие угловое движение ЛА независимо по каждой оси $\gamma(t)$, $\psi(t)$, $\theta(t)$. Следящие приводы (4) приводят в движение карданные кольца ДМС (10), (9), (7) по осям (3), (5), (8) независимо по каждой. Происходит «механическое возмущение» ГСП от ДМС-1 через естественные связи ГСП с внешней средой, трение в осях карданова подвеса платформы ГСП, течение токоподводов и т. д. Сигналы, снимаемые с ГСП и ДМС, поступают в «математическую часть» контура моделирования, а также обрабатываются и анализируются в вычислительных блоках ДМК.

Мини-ЭВМ ТСИ моделирует работу БЦВМ (блок (9) на рис. 4.6), реализует требуемые управления σ_x , σ_y рулевых приводов ЛА.

В результате испытаний этой САУ, в частности, определялись амплитудные и фазовые частотные характеристики (АФЧХ) ГСП как датчика углового положения ЛА, «уходы» ГСП в условиях движущегося основания, возмущающие и стабилизирующие моменты, действующие на эту САУ, и т. д.

На ПОЯ испытательная формулируются просятные операции: определить динамические ошибки ГСП... САУ ЛА... в режиме движения вокруг центра тяжести при возмущениях по каналам θ , ψ , γ ...; Вывести графики θ , ψ , γ .

На рис. 10.11 приведены качественные оценки углов как функций времени, снятых с датчиков наружной оси ГСП $\psi_{ГСП}$ при поступлении на наружную ось ДМС-1 гармонической и случайной качки основания ψ_c . Как следует из результатов обработки, возмущающие воздействия включают в себя гармоническую составляющую качки $\psi_{вх} = \psi_{вх0} \sin 2\pi f t$ с частотами $f = 0.01 \div 1$ Гц, постоянных угловых скоростей и ускорений $\dot{\Omega}_{вх}(t) = \pm 6,4$ град/с; $\ddot{\Omega}_{вх}(t) = \pm 4$ град/с², а также случайную качку с автокорреляционной функцией вида

$$R_{\psi_{вх}} = \sigma_{\psi_{вх}}^2 e^{-\alpha|t|} \left(\cos \omega_0 t + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 |t| \right),$$

где $\sigma_{\psi_{вх}} = 0,5$ град; $\omega_0 = 6,28$ рад/с; $\alpha = 1$ рад/с.

Для обработки полученной в ходе испытаний информации с целью получения требуемых характеристик ГСП используется пакет программ «Обработка» подсистемы «Анализ», реализуемый на мини-ЭВМ ДМК.

Применение подсистемы «Испытания» для параметрической идентификации САУ проводится согласно структурной схеме, представленной на рис. 10.12. В основу применения подсистемы для этой цели положен принцип настраиваемой модели (см. § 4.1, рис. 4.2).

В качестве критерия используется функционал (4.40). Алгоритм настройки модели организуется как бесконечный на основе машинно-аналитического метода. В этом случае составляющие градиента функционала $U(\lambda)$ вычисляются аналитически. Действительно, обозначив в (4.40) $\tilde{Y}(t, S) - \tilde{Y}_s(t, S) = \varepsilon(t, S) = U$ и

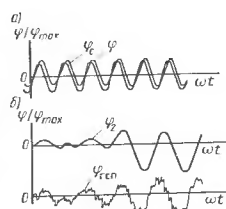


Рис. 10.11. Реализация процессов при испытаниях ГСП

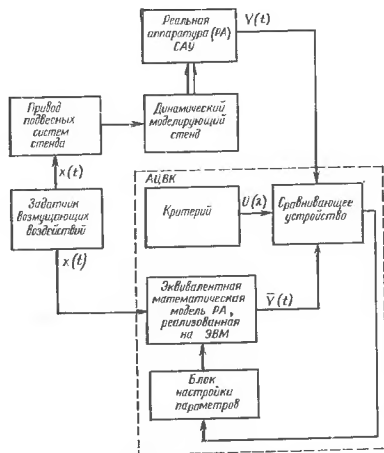


Рис. 10.12. Применение подсистемы «Испытания» для параметрической идентификации САУ

учитывая, что $S = S(\lambda, t)$, найдем

$$\frac{\partial U}{\partial \lambda} = -2 \frac{1}{T} \int_0^T e(t, S) \frac{\partial Y_2}{\partial S} \frac{\partial S}{\partial \lambda} dt,$$

где $\partial S / \partial \lambda$ — матрица чувствительности (4.39), а $\partial Y_2 / \partial S$ — известная функция времени. Процедура настройки параметров математической модели в процессе идентификации реализуется на АЦВК.

1. Анализ и оптимальный синтез на ЭВМ систем управления / Г. А. Дидук, И. А. Орурк, А. С. Коновалов и др.; Под ред. А. А. Воронова и И. А. Орурка. — М.: Наука, 1984.
2. Барковский В. В., Захаров В. Н., Шаталов А. С. Методы синтеза систем управления. — М.: Машиностроение, 1981.
3. Белоша Д. А., Кузин Р. Е. Применение ЭВМ для анализа и синтеза автоматических систем управления. — М.: Энергия, 1979.
4. Бессекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М., 1976.
5. Васильев А. А., Иллев Д. Х. Машинные методы расчета систем управления. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1981.
6. Воронов А. А. Теория автоматического управления. — М.: Высшая школа, 1977. Ч. II.
7. Горанский Г. К., Бендерев Э. И. Технологическое проектирование в комплексных автоматизированных системах подготовки производства. — М.: Машиностроение, 1981.
8. Кривошизов Д. В., Шалаев П. А. Стандартизация в области систем автоматизированного проектирования изделий и технологических процессов в машиностроении. — М.: Изд-во стандартов, 1987.
9. Норенков И. П. Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем. — М.: Высшая школа, 1986.
10. Руководство по проектированию систем автоматического управления / В. А. Бессекерский, В. Ф. Власов, В. Н. Гомзин и др. — М.: Высшая школа, 1983.
11. Ракитский Ю. В., Черноруцкий И. Г., Устинов С. М. Численные методы решения жестких систем. — М.: Наука, 1979.
12. Солодовников В. Б., Плотноков В. А., Яковлев А. В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования. — М.: Машиностроение, 1985.
13. Солнцев Р. И. Основы автоматизации проектирования гироскопических систем. — М.: Высшая школа, 1985.
14. Солнцев Р. И., Андронов В. Н. Основы математического обеспечения САПР. — Л.: ЛИАП, 1988.
15. Солнцев Р. И., Кане М. А. Основы САПР. — Л.: ЛИАП, 1987.
16. Теория автоматического управления. Ч. I. Теория линейных систем автоматического управления / А. А. Воронов, Г. А. Дидук, А. А. Воронов и др.; Под ред. акад. А. А. Воронова. — М.: Высшая школа, 1986.
- ✓ 17. Теленс Я. Ф. Работа конструктора. — Л.: Машиностроение, 1987.
18. Тищенко Н. М. Введение в проектирование систем управления. — М.: Энергоатомиздат, 1986.

Предисловие	3
Глава 1. Введение в автоматизацию проектирования систем автоматического управления	5
§ 1.1. Системы автоматического управления (САУ) как объекты проектирования	5
§ 1.2. САПР как новые средства проектирования	15
§ 1.3. Этапы истории развития САПР САУ	21
Глава 2. Процесс проектирования САУ и его автоматизация	27
§ 2.1. Цели, критерии и условия ограничений процесса проектирования	27
§ 2.2. Этапы проектирования и проектные процедуры	33
§ 2.3. Модели процесса проектирования	50
§ 2.4. Анализ возможностей автоматизации процесса проектирования	59
§ 2.5. Оценка технико-экономической эффективности автоматизации проектирования	62
Глава 3. Структура системы автоматизации проектирования САУ	68
§ 3.1. Концепция, принципы и их структурная реализация	68
§ 3.2. Техническое обеспечение	79
§ 3.3. Математическое обеспечение	94
§ 3.4. Лингвистическое обеспечение	115
§ 3.5. Программное обеспечение	120
§ 3.6. Информационное обеспечение	124
§ 3.7. Методическое и организационное обеспечение	130
Глава 4. Автоматизация построения математических моделей САУ	132
§ 4.1. Методы построения математических моделей и их применение в САПР	132
§ 4.2. Вывод математических моделей в аналитическом виде на ЭВМ	138
§ 4.3. Упрощение и преобразование математических моделей на ЭВМ	146
§ 4.4. Подсистема САПР САУ «Построение математических моделей»	155
Глава 5. Моделирование систем автоматического управления	163
§ 5.1. Методы моделирования и их применение в САПР	163
§ 5.2. Приведение математических моделей САУ к виду, удобному для моделирования	166
§ 5.3. Численные методы и алгоритмы моделирования	172
§ 5.4. Контроль и оценка точности моделирования	187
§ 5.5. Подсистема САПР САУ «Моделирование»	190
Глава 6. Автоматизация анализа САУ	198
§ 6.1. Методы анализа САУ и их применение в САПР	198
§ 6.2. Машинные методы анализа	219
§ 6.3. Машинно-аналитический метод анализа	226
§ 6.4. Подсистема САПР САУ «Анализ»	233

Глава 7. Автоматизация синтеза САУ	237
§ 7.1. Методы синтеза САУ и их применение в САПР	237
§ 7.2. Машинные методы синтеза	250
§ 7.3. Подсистема САПР САУ «Синтез»	262
Глава 8. Автоматизация конструкторской разработки САУ	269
§ 8.1. Методы конструкторской разработки и их применение в САПР	269
§ 8.2. Автоматизация разработки и изготовления конструкторской документации	274
§ 8.3. Подсистема САПР САУ «Конструирование»	283
Глава 9. Автоматизация технологического проектирования САУ	291
§ 9.1. Методы технологического проектирования и их применение в САПР	291
§ 9.2. Автоматизация технологической подготовки обработки деталей	296
§ 9.3. Подсистема САПР САУ «Технологическое проектирование»	299
§ 9.4. Связь подсистемы «Технологическое проектирование» с производством	307
Глава 10. Автоматизация испытаний САУ	312
§ 10.1. Методы испытаний САУ и их применение в САПР	312
§ 10.2. Динамический моделирующий комплекс	317
§ 10.3. Динамические моделирующие стенды	321
§ 10.4. Подсистема САПР САУ «Испытания»	327
Список литературы	333

Учебное издание

Сольницев Ремир Иосифович

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

Зав. редакцией *И. И. Хрусталева*
Редактор *В. И. Милешин*
Младший редактор *Н. Е. Овчаренко*
Художник *А. В. Алексеев*
Художественный редактор *Л. К. Громова*
Технические редакторы *В. М. Романова, С. В. Талагашева*
Корректор *Г. И. Кострикова*

ИБ № 8253

Изд. № СДЛ-670. Сдано в набор 25.07.90. Подписано в печать 05.12.90.
Формат 60×88/16. Бум. офс. № 1. Гарнитура литературная. Печать офсетная.
Объем 20,88 усл. печ. л., 20,68 усл. кр.-отт., 21,84 уч.-изд. л. Тираж 15 000 экз.
Зак. № 516. Цена 1 р. 70 к.

Издательство «Высшая школа», 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14.

Московская типография № 8
Государственного комитета СССР по печати, 101698, Москва, Хохловский пер., 7